Aus der Neurologischen Klinik des Bürgerhospitals Stuttgart
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. J. Finke
– Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Tübingen –

Vergleichende Untersuchungen über die Vibrationsempfindung (Stimmgabel und elektronisches Vibrationsmeßgerät)

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der

MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Gerhard Hinrich Friedrichs
aus Detmold

1980

Aus der Neurologischen Klinik des Bürgerhospitals Stuttgart
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. J. Finke
– Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Tübingen –

Vergleichende Untersuchungen über die Vibrationsempfindung (Stimmgabel und elektronisches Vibrationsmeßgerät)

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der

MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Gerhard Hinrich Friedrichs

aus Detmold

1980

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan:	Prof. Dr. H. Heimann
Berichterstatter:	Prof. Dr. J. Finke
	(Prof. Dr. J. Dichgans)

INHALTSVERZEICHNIS:

		Seite
1.	Einleitung	2
2.	Literaturüberblick	3
2.1.	Theorien über Vibrationsempfindung	3
2.2.	Rezeptoren und Leitungsbahnen	4
2.3.	Vibrationsschwellenabhängigkeit	6
2.3.1.	Absolutschwelle	7
2.3.2.	Frequenzabhängigkeit	7
2.3.3.	Auflagedruckabhängigkeit	8
2.3.4.	Reizflächenabhängigkeit	8
2.3.5.	Ortsabhängigkeit	8
2.3.6.	Temperaturabhängigkeit	9
2.3.7.	Altersabhängigkeit	9
2.3.8.	Adaptation	9
2.3.9.	Aufmerksamkeit	1o
2.3.1o.	Anklingzeit	1o
2.4.	Vibrationsempfindung bei Polyneuropathie	11
2.5.	Vibrationsempfindung bei Multipler Sklerose	12
2.6.	Messung der Vibrationsempfindung	14
3.	Eigene Untersuchungen	19
3.1.	Beschreibung der angewendeten Meßmethoden	19
3.1.1.	Messung mit der Stimmgabel	2o
3.1.2.	Elektronische Eichung der Stimmgabel-skalierung	2o
3.1.3.	Beschreibung des Vibrationsmeßgerätes	25
3.2.	Auswahl der Versuchspersonen	3o
3.3.	Meßergebnisse	32
4.	Auswertung	37
4.1.	Altersabhängigkeit der Vibrationsschwelle	37
4.2.	Gruppenvergleich zwischen Gesunden und Patienten	39
4.3.	Vergleich der verwendeten Meßmethoden	44
5.	Diskussion	49
6.	Zusammenfassung	51
7.	Literaturverzeichnis	52
8.	Verzeichnis der Abkürzungen	57

1. Einleitung

Systematische Untersuchungen über das Vibrationsempfinden werden in der wissenschaftlichen Literatur seit etwa 1oo Jahren berichtet. In der Neurologie kommt insbesondere der gestörten Vibrationsempfindung (=VE) die Bedeutung eines diagnostischen Merkmals zu, wie dies bereits TREITEL 1892 erkannte. Die VE ist eine der höchsten Leistungen des sensiblen Systems überhaupt. Wie alle hochdifferenzierten Funktionen ist sie besonders vulnerabel. Deshalb finden sich Störungen der VE oft als Frühsymptom.
Der Befund einer herabgesetzten (oder aufgehobenen) VE spricht für eine Läsion der Hinterstränge oder der Hinterwurzeln des Rückenmarks, der peripheren Nerven oder aber auch zentraler sensibler Strukturen. Der Kliniker mißt die VE im allgemeinen durch Aufsetzen schwingender Stimmgabeln über Knochenstrukturen und bestimmt vergleichend die Abklingzeit. Der Meßfehler ist dabei groß und kann mehrere hundert Prozent betragen.

In der vorliegenden Arbeit werden klinische Untersuchungen als Vergleich zwischen einer herkömmlichen Stimmgabelmeßmethode und einer standardisierten Schwellenbestimmung mit einem neuentwickelten elektronischen Vibrationsmeßgerät beschrieben. Untersucht wurden 31 gesunde Kontrollpersonen, 31 Patienten mit Polyneuropathie (=PNP) und 31 Patienten mit Multipler Sklerose (=MS).

2. Literaturüberblick

2.1. Theorien über Vibrationsempfindung

Unter VE werden sinnesphysiologisch solche Empfindungen verstanden, die, "hervorgerufen durch einen diskontinuierlichen oder diskontinuierlich wirkenden Reiz, uns darüber unterrichten können, daß sich entweder auf unserer Haut oder in unserer Umgebung Erschütterungen abspielen" (VON SKRAMLIK, 1937).
Dabei ist man sich bis heute noch nicht einig, ob man die VE als Teil einer allgemeinen Befähigung aller Sinnesorgane zu rhythmischer, diskontinuierlicher Erregung auffassen soll oder als eine eigene Sinnesqualität.

Untersuchungen über das Vibrationsempfinden werden ab 1860 berichtet. Damals löste VALENTIN Vibrationsgefühle durch rotierende Scheiben aus. 1869 verwendete v.WITTLICH als erster Stimmgabeln. ERHARD soll 1872 die VE gekannt und zu diagnostischen Zwecken benutzt haben (KLEIN, 1969). 1889 berichtet RUMPF im Neurologischen Zentralblatt über einen Fall von Syringomyelie, wobei er zur Sensibilitätsprüfung eine Reihe von Stimmgabeln mit unterschiedlicher Schwingungsfrequenz verwendete. Für das Gefühl des Schwirrens, wie man es z.B. beim Halten einer schwingenden Stimmgabel spürt, führte TREITEL 1897 den Ausdruck "Vibrationsgefühl" ein. Aufgrund seiner Untersuchungen des Vibrationsgefühls an verschiedenen Körperstellen an Gesunden und an Patienten mit Tabes dorsalis bzw. alkoholischer PNP kam er wohl als erster zu dem Schluß, daß das Vibrationsgefühl nicht mit dem Tastsinn identisch ist. RYDEL und SEIFFER prägten 1903 den Begriff "Pallaesthesie". Sie glaubten, daß die VE ausschließlich der sog. Tiefensensibilität zuzuordnen sei, die sich aus der Empfindlichkeit des Periosts, der Muskeln, Sehnenfaszien, Gelenken und deren Kapseln zusammensetzt.

EGGER und DEJERINE sahen das Periost als Sitz der zugehörigen Rezeptoren (M. EGGER, "De la sensibilité osseuse", Journal de Physiologie et Pathologie Générale, 1890), während die Physiologen (unter Führung von v. FREY) und die Psychologen (besonders KATZ) in der Haut gelegene Empfänger, nämlich die Druckrezeptoren hierfür in Anspruch nahmen. V. v.WEIZSÄCKER (1937) weist darauf hin, daß beim Vibrationsgefühl das Wort "Sinn" unangebracht sei, weil ein besonderer Rezeptor (noch) nicht bekannt sei. Er schlägt daher den auch in dieser Arbeit verwendeten Begriff "Vibrationsempfindung" vor.

2.2. Rezeptoren und Leitungsbahnen

In neuerer Zeit ist vor allem die Arbeit von KEIDEL bemerkenswert. Nach KEIDEL (1956) kommen vor allem die Meißnerschen, Vater-Pacinischen und Merkelschen Körperchen als "oberflächliche Vibrationsrezeptoren" sowie Muskel- und Sehnenspindeln als "tiefe Vibrationsrezeptoren" in Betracht.
Alle oberflächlichen Vibrationsrezeptoren sind in Scheiben, Schalen oder Menisken angeordnet. Der adäquate Reiz zur VE ist nach KEIDEL der Wechseldruck als Sonderform des Reizes "Druck".

Die Nervenversorgung dieser Hautrezeptoren ist sehr verzweigt, und zwar derart, daß sowohl eine Nervenfaser mehrere Rezeptoren versorgt, als auch, daß ein Rezeptor von mehreren Nervenfasern versorgt wird. Das macht eine exakte Lokalisation der VE unmöglich. Außerdem breiten sich die Wechseldruckwellen in der Haut aus und werden schon darum in einem viel größeren Areal empfunden, als es der Aufnahmefläche des vibrierenden Instruments entspräche.

In den letzten Jahren zeigte sich zunehmend die Bedeutung der Vater-Pacinischen Körperchen für die Vibrationsrezeption, die schon 1932 TAIT (zit. bei CALNE und PALLIS, 1966) für spezifische VE-Rezeptoren hielt. Bei Menschen finden sich Vater-Pacinische Körperchen in der Subcutis, insbesondere in den Fingerspitzen, den Handflächen, den Zehen und Fußsohlen. Ebenso finden sie sich im Periost, in Faszien, in der Umgebung von Gelenken, im Pankreas, entlang von Nervensträngen, in der Adventitia von Blutgefäßen, den Brustwarzen und den äußeren Genitalien (CALNE und PALLIS, 1966).

SILBERNAGL (1979) schreibt: "Die Pacinischen Körperchen sind darauf spezialisiert, Vibrationen zu registrieren. Bei einer einmaligen Änderung der Reizstärke reagieren sie nur mit einem Impuls, ganz gleich, wie hoch die Änderungsgeschwindigkeit war. Ändert sich jedoch (wie bei einer Vibration) diese Geschwindigkeit dauernd (d.h. ist die Beschleunigung der Hautverschiebung größer oder kleiner), ergibt sich eine zu dieser Beschleunigung proportionale Impulsfrequenz im ableitenden Nerv. Solche Beschleunigungsdetektoren finden sich außer in der Haut auch in Sehnen, Muskeln und Gelenkkapseln, d.h. sie spielen auch bei der Tiefensensibilität eine Rolle."

Mit zunehmendem Alter zeigen die Pacinischen Körperchen regressive Veränderungen. Sie werden kleiner und unregelmäßiger, was möglicherweise die bekannte Abnahme der VE im Alter erklärt (CALNE und PALLIS, 1966).

Nach Transformation des Vibrationsreizes wird die Erregung nach HORANY (1952) und HENSEL (197o) durch die dicken markhaltigen A-ß-Fasern der peripheren Nerven geleitet. HORANY konnte zeigen, daß bei der bekannten durch Anoxämie aufgehobenen Leitungsfähigkeit der A-Fasern im peripheren Nervensystem zuerst die VE ausfällt. Die Nervenleitung blieb aber völlig ungestört, falls die marklosen C-Fasern durch Novocain blockiert waren.

Die Leitungsbahnen für die oberflächliche und tiefe Vibrationsrezeption gibt KEIDEL an: Für die oberflächliche Vibrationsrezeption, den Druckrezeptoren der Haut, verläuft das erste Neuron im Fasciculus gracilis (GOLL) und cuneatus (BURDACH) zur Medulla und den dazugehörigen Kernen (Nucleus gracilis und cuneatus). Das zweite Neuron geht zum Teil mit der Flechsig'schen Kleinhirnseitenstrangbahn zum Kleinhirn, von dort als drittes Neuron zum Thalamus und als viertes Neuron weiter zur Rinde. Zum anderen Teil verläuft das zweite Neuron unter Kreuzung in der medialen Schleife als Tractus bulbothalamicus direkt zum Thalamus und dann zur Rinde. Die tiefe Vibrationsrezeption, ausgehend von den sensiblen Muskelorganen, verläuft erstens als erstes Neuron zu den Strangzellen des Rückenmarks, im zweiten Neuron als Tractus spinocerebellaris ventralis (GOWER) zur Brückenhaube und weiter zur Rinde des Kleinhirnwurmes. Von hier geht es als drittes Neuron zum Thalamus und als viertes Neuron zum Gyrus centralis posterior der Rinde. Zweitens kann die tiefe VE auch über die Zellen der Clark'schen Säule und des Stilling'schen Kernes als Tractus spinocerebellaris dorsalis (FLECHSIG) über das Corpus restiforme zur Rinde des Kleinhirnwurmes gelangen. Von hier geht es zum Gyrus centralis posterior. Jetzt kommt es wahrscheinlich zur Umschaltung, zu den sekundären sensorischen Rindenfeldern.

2.3. Vibrationsschwellenabhängigkeit

Die Reizschwelle der VE ist von vielen Faktoren abhängig, die einerseits in dem untersuchten Individuum liegen und die andererseits mit der angewendeten Untersuchungsmethode zusammenhängen. Aus zahlreichen Untersuchungen ist die Abhängigkeit vor allem von der Frequenz, dem Auflagedruck des Vibrators, der gereizten Körperstelle und der Reizfläche, von der Umgebungstemperatur sowie vom Alter und von der Aufmerksamkeit des Untersuchten bekannt.

2.3.1. Absolutschwelle

Über die Größe der Absolutschwelle der VE herrscht Klarheit. Man mißt sie zweckmäßig als Deformation der Haut, also in der Dimension einer Längeneinheit. Die zur Auslösung einer VE nötigen Deformationen der Haut sind außerordentlich klein. Die erste quantitative Angabe findet sich bei KATZ und NOLDT (1926). Sie verwendeten erstmalig zur Messung einen elektromagnetischen Vibrator, dessen Auslenkungen mit dem mikroskopischen Meßokular bei einer Schwingungsfrequenz von 5o Hz gemessen wurden. Sie fanden an der Fingerspitze Schwellenauslenkungen von o,3 - o,9 µm (1 µm = 1/1ooo mm).
SETZEPFAND (1935) gab eine Minimalschwelle von o,o25 µm, v. BEKESY (1939) o,o7 µm und WILSKA (1954) o,o6 µm an. KEIDEL (1956) fand bei 19 Versuchspersonen bei Optimalfrequenz Minimalschwellen von o,o13 - 1,2 µm.

2.3.2. Frequenzabhängigkeit

Schon RYDEL und SEIFFER (19o3) beschäftigten sich eingehend mit der Frequenzabhängigkeit der Schwelle. Sie fanden ein Optimum bei ihren Stimmgabeluntersuchungen zwischen 1oo und 2oo Hz und stellten fest, daß die Schwelle bei höheren Frequenzen rasch sinkt und bei 5oo Hz schon die Grenze der Empfindungsmöglichkeit erreicht ist. Zu den tieferen Frequenzen hin sinkt die Schwelle wesentlich langsamer. SETZEPFAND (1935) und v. BEKESY (1939) und in neuerer Zeit RITTMANNSBERGER (1968) fanden übereinstimmend ein Empfindungsoptimum bei 2oo - 3oo Hz. Die untere Frequenzgrenze liegt bei verschiedenen Autoren zwischen o und 5o Hz. Die Bestimmung ist sehr schwierig, da die VE kontinuierlich in reine Druckempfindung übergeht.
Für die obere Frequenzgrenze sind nur Messungen mit einem elektrischen Vibrator zu verwerten, da hier Auflagedruck, -fläche und Adaptation eine sehr große Rolle spielen. Die Angaben schwanken bei den einzelnen Autoren zwischen 528 und 8192 Hz (GOODFELLOW, 1933).

Bei Frequenzen über 3oo Hz steigt die Schwelle stark an, was durch die mechanischen Eigenschaften der Haut sowie durch die Trägheit der synaptischen Verarbeitung und die Refraktärzeit der nervösen Leitungsbahnen erklärt wird.

2.3.3. Auflagedruckabhängigkeit

Nach KEIDEL wird mit zunehmendem Auflagedruck des Vibrators eine Schwellensenkung und eine Verschiebung zur optimalen Reizfrequenz zu höheren Werten (3oo-4oo Hz) erreicht. SCHILLING und BIENER (1959) zeigen jedoch, daß Auflagedruckveränderungen, soweit sie nicht extreme Werte annehmen, bedeutungslos sind. Nach KEIDEL ändert sich die Reizschwelle erst bei sehr erheblichen Auflagedruckdifferenzen, die mindestens fünf Zehnerpotenzen der Maßeinheit dyn/cm^2 erreichen müssen.

2.3.4. Reizflächenabhängigkeit

COHEN und LINDLEY (1938) fanden bei Vergrößerung der kreisförmigen Reizfläche des Vibrators einen Schwellenanstieg bei Untersuchung am Oberschenkel, während die Schwelle bei Untersuchung über der Tibia analog dem Verhalten des Drucksinnes abfiel. Wirksam ist für die VE der Begrenzungskreis der Reizfläche (KEIDEL, 1956).
WILSKA (1954) fand bei Untersuchung über Knochenpunkten bei Veränderung der Reizflächengröße zwischen 1 und 1oo mm^2 praktisch keinen Einfluß auf die absolute Schwellenamplitude.

2.3.5. Ortsabhängigkeit

Die Schwellenunterschiede der einzelnen Körpergegenden sind erheblich. Dies zeigte sich bei Stimmgabeluntersuchungen von TREITEL (1897), RYDEL und SEIFFER (19o3), STERLING (19o5) und SYMNS (1912). Von LAIDLAW (1937) und zuletzt von WILSKA (1954) wurden mit elektrodynamischen Vibratoren sehr genaue Zahlen zur Ortsabhängigkeit der Vibrationsschwelle beigebracht. Danach sind Finger, Handfläche und Fußsohle am empfindlichsten, während Gluteal- und Abdominalregion am unempfindlichsten sind.

Nach KEIDEL sind diese Unterschiede auf zwei interferierende Vorgänge zurückzuführen, und zwar einmal auf den Einfluß des verschiedenen Unterlagegewebes (Fett, Muskulatur, Knochen) auf die physikalischen Eigenschaften des "Antransportorgans" (Gewebe zwischen Vibrator und Rezeptor), und zum anderen die örtliche unterschiedliche Dichte der Rezeptoren.

2.3.6. Temperaturabhängigkeit

Nach WEITZ (1941) sinkt die Vibrationsschwelle ab bei Erwärmung der Haut von 36,9°C um 3°. Bei weiterer Erwärmung oder bei Abkühlung unter 36,9°C fand er ununterbrochen steigende Vibrationsschwellen.

2.3.7. Altersabhängigkeit

Die Altersabhängigkeit der Reizschwelle wurde in den letzten Jahren mehrfach untersucht. PEARSON (1929) fand einen deutlichen Schwellenanstieg vom 5. Dezenium an.
STEINESS (1957) und PERRET und REGLI (197o) konnten zeigen, daß der altersabhängige Schwellenanstieg an den Füßen ausgeprägter ist als an den Händen, was letztere mit zusätzlichen Störungen der Reizleitung erklären, die sich mit den oben beschriebenen regressiven Veränderungen der Pacinischen Körperchen summieren.
Zu entsprechenden Ergebnissen kommen SEILER und RICKER (1971) an 1oo gesunden Versuchspersonen im Alter von 3-84 Jahren.

2.3.8. Adaptation

Die Adaptation, die sich in der Inkonstanz der Empfindungsstärke-Reizstärke-Relation bemerkbar macht, ist frequenzabhängig und ortsunabhängig.

RAICH (1952) konnte zeigen, daß 15 Sekunden nach dem Absetzen eines dreiminütigen Reizes die Vibrationsschwelle um das zwei- bis dreifache erhöht ist, um nach 15o Sekunden die Ausgangsschwelle zu erreichen, die dann nach 225 Sekunden um 17 % unterschritten wird, um erst später die Normalschwelle zu erreichen und dann diese um 24 % ein zweites Mal zu überschreiten.

2.3.9. Aufmerksamkeit

Wie bei allen Sensibilitätsprüfungen hängt auch das Ergebnis der Vibrationsreizschwellenbestimmung entscheidend von der Mitarbeit und der Aufmerksamkeit des Untersuchten ab. Es ist bemerkenswert, daß in den zahlreichen klinischen Untersuchungen über das Vibrationsempfinden dieser Aspekt kaum je genauer betrachtet wird. KEIDEL beobachtet einen Anstieg der Vibrationsschwelle bei allen Einflüssen, die die psychische Konzentrationsschwelle vermindern, besonders bei akustischen und weniger bei optischen Störreizen.
TOOMEY et al. (1949) fanden bei mehrstündig fortgesetzt wiederholten Schwellenbestimmungen Abweichungen bis zu 1oo %.

2.3.1o. Anklingzeit

Mit elektrisch betriebenen Vibratoren kann die Anklingzeit bis zur ersten Wahrnehmung einer VE bestimmt werden. Vom plötzlichen Einschalten der Schwingung bis zur vollständigen VE vergehen nach v. BEKESY (1939) etwa o,12 sec (in einer zugeordneten Abbildung wird allerdings ein um den Faktor 1o größerer Wert von 1,2 sec angegeben). RITTMANNSBERGER (1967) fand ebenfalls einen Wert von etwa o,1 sec.

2.4. Vibrationsempfindung bei Polyneuropathie

Unter einer PNP versteht man eine polytope Erkrankung, die meist mehr oder weniger symmetrisch eine Reihe peripherer Nerven betrifft. Die Pathogenese der Polyneuropathien ist uneinheitlich, wobei Stoffwechselstörungen, toxische Schädigungen, autoimmune bzw. allergische Prozesse, Schädigungen durch Bakterien oder Viren, Läsionen der vasa nervorum, genetisch bedingte Störungen des Myelinstoffwechsels, Einlagerung von Fremdstoffen oder echte entzündliche Infiltrationen infrage kommen.
Die meisten Patienten klagen zunächst über sensible Störungen und Parästhesien, brennende Sensationen und ziehende Mißempfindungen. Diese sind distal lokalisiert, in den allermeisten Fällen zunächst an den unteren Extremitäten beginnend, später manchmal auch die oberen Extremitäten und auch hier zunächst die Hände befallend. Motorische Ausfälle werden sehr viel seltener subjektiv empfunden.

Unter den objektiven neurologischen Untersuchungsbefunden figuriert in erster Linie das Fehlen von Reflexen, weitaus am häufigsten das Fehlen des Achillessehnenreflexes. Die Sensibilitätsstörungen sind ebenfalls distal akzentuiert und müssen bewußt und sorgfältig gesucht werden. Vor allem sind die epikritischen Qualitäten, insbesondere die Zweipunktdiskrimination, das Münzenerkennen sowie das Erkennen der auf die Haut geschriebenen Zahlen und der Vibrationssinn betroffen (MUMENTHALER, 1963).

Auf letzteres hatte bereits TREITEL 1897 hingewiesen. Er schreibt: "Bei der Polyneuritis alcoholica dürfte das Vibrationsgefühl zu einem diagnostischen Merkmal führen, wenn es sich in weiteren Fällen bestätigt, daß es (das Vibrationsgefühl) an den Unterschenkeln bedeutend vermindert ist, während Tastsinn und Schmerzgefühl erhalten sind."

Seither haben zahlreiche Untersucher diese Vermutung bestätigt. RYDEL und SEIFFER (19o3), STERLING (19o5), SYMNS (1912) und BARACH (1947) fanden mit Stimmgabeluntersuchungen bei allerdings kleinen Fallzahlen entsprechende Störungen des Vibrationsempfindens bei Patienten mit PNP unterschiedlicher Genese.

In neuerer Zeit konnten MIRSKY (1953), STEINESS (1957) und BERCHTOLD (1967) bei 1o2 bzw. 63 bzw. 124 Diabetikern, SEILER und RICKER (1971) bei PNP verschiedener Ätiologie, DUENSING et al. (1975) bei 51 Patienten mit urämischer PNP und ROOS (1977) bei 42 gastrektomierten Patienten mit niedrigen Vitamin B12-Serumspiegeln mit Hilfe von elektrisch betriebenen Vibratoren die herabgesetzte VE insbesondere an den unteren Extremitäten nachweisen.

Im Hinblick auf die diabetische Neuropathie schreibt BISCHOFF 1966: "Die Herabsetzung der Vibrationsempfindung, geprüft mittels Stimmgabeln mit Schwingungszahlen von 128 bis 256, bestätigte sich als das am meisten verbreitete Symptom. Ungeachtet der physiologisch noch ungeklärten Fragen um das Wesen dieser komplexen Sinnesqualität herrscht ziemliche Übereinstimmung über die besondere Vulnerabilität dieses Funktionselements. Diese Tatsache stempelt die Störung dieser Empfindungsqualität zum allgemein anerkannten Frühsymptom auch der diabetischen Neuropathie."

2.5. Vibrationsempfindung bei Multipler Sklerose

Pathologisch-anatomisch ist die MS charakterisiert durch herdförmige Demyelinisationen ohne Destruktion der Axone, außer in sehr akuten Herden. Derartige Veränderungen können überall im zentralen Nervensystem vorkommen, besonders häufig aber um den Aquädukt, am Boden des vierten Ventrikels und im Rückenmark mit der Basis subpial. Die Ursache der MS ist nicht bekannt. Allgemein klinische Charakteristika

der Erkrankung sind in typischen Fällen multiple, zeitlich gestaffelte Schübe (mit vollständiger oder partieller Rückbildung der Symptome zwischen einem Schub und dem nächsten) sowie eine multiple topische Lokalisation der Krankheitsherde im zentralen Nervensystem, was der sehr unterschiedlichen klinischen Symptomatologie zugrunde liegt. Hierbei können zur selben Zeit Symptome von seitenverschiedener Lokalisation vorhanden sein. Andererseits können auch anläßlich verschiedener Krankheitsschübe, also nacheinander verschiedene Systeme betroffen sein.

So können auch verschiedene Sensibilitätsstörungen und vor allem auch Störungen der VE vorliegen. RYDEL und SEIFFER (1903) fanden bei vier Patienten mit MS bei sonst intakter Hautsensibilität eine deutliche Herabsetzung der VE. Störungen des Vibrationsempfindens bei MS beobachteten auch STERLING (1905) und SYMNS (1912). CLAUDE und EGGER (1906) untersuchten 22 MS-Patienten und fanden die VE in 20 Fällen gestört, ebenso BILLEY, DUDGEON und LOUD in 14 von 23 Fällen. Bei 37 von MANN (1926) untersuchten Patienten mit spastisch-ataktischer Symptomatik bestanden bei 32 Patienten deutliche Vibrationsempfindungsstörungen (zit. in KLEIN, 1969). KLEIN (1969) kann mit einer apparativen Untersuchungstechnik bei 26 Patienten mit unterschiedlicher MS-Symptomatik in allen Fällen Vibrationsempfindungsstörungen nachweisen.

Ähnlich wie bei den bei der PNP beschriebenen Sensibilitätsstörungen wird auch bei der MS übereinstimmend ein bevorzugtes Auftreten von Empfindungsstörungen an den unteren Extremitäten und da wiederum in den distalen Gliedmaßenabschnitten gefunden. Erklärt wird dies durch den bevorzugten Befall der Hinterstrangbahnen mit entzündlichen Herden und den dadurch hervorgerufenen

demyelinisierenden Veränderungen, die zu einer Verlangsamung der intraspinalen Nervenleitgeschwindigkeit führen, was dann zunächst zur Beeinträchtigung der VE und erst bei weiterem Fortschreiten auch zum Ausfall anderer Sinnesqualitäten führt (MANN, 1926).

2.6. Messung der Vibrationsempfindung

Der Literaturüberblick zeigt, daß die Meßverfahren zur Bestimmung der Vibrationsschwelle entsprechend dem jeweiligen physiologischen und technischen Wissensstand verfeinert wurden. Als Maß für die veränderte Funktionslage der VE wird die Wahrnehmungsschwelle benutzt, von der an eine Vibration nicht mehr oder gerage erst möglich ist. Für klinisch-diagnostische Zwecke wird auch heute meistens eine schwingende Stimmgabel benutzt, die mit dem Griff über Knochenstrukturen aufgesetzt wird.
RUMPF (1889) prüfte so mit einer Reihe von Stimmgabeln verschiedener Frequenz, in welcher Weise verschiedene Körperteile die Schwingungen differenzieren konnten.
TREITEL (1897) konnte mit seiner Methode, die Abklingzeit (vom möglichst gleichmäßigen Anschlagen der Stimmgabel bis zum Ende der subjektiven VE) in Sekunden zu messen, bereits recht brauchbare relative Vergleichswerte zwischen verschiedenen Körperstellen darstellen. Er sah voraus, daß sich ein diagnostisches Merkmal aus dem Nachweis einer Funktionsstörung der VE ableiten läßt.
RYDEL und SEIFFER (19o3) führten das optische Verfahren nach GRADENIGO ("Un nuovo metodo ottico di acumetria", J. Laryngology. November 1899, zit. in RYDEL und SEIFFER) in die Nervenklinik ein. Hierbei wird eine Dreieckskontur seitlich auf einer Stimmgabelklemme angebracht. Beim Anschlagen der Stimmgabel entsteht nun optisch der Eindruck einer verwischten Kontur, die in der Mitte ein kleineres, klar begrenztes Dreieck erkennen läßt.

Mit Abnahme der Schwingungsamplitude vergrößert sich das virtuelle Dreiecksbild, bis es schließlich die Größe der tatsächlichen Dreieckskontur erreicht.

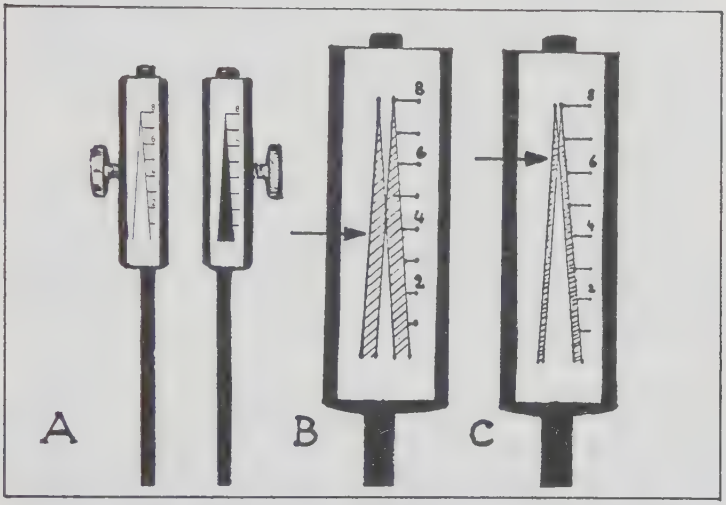


Abb. 1 Schwingungsdreiecke nach Gradenigo auf den Stimmgabelklemmen.
A in Ruhe,
B bei hoher Schwingungsamplitude,
C bei kleiner Schwingungsamplitude.

Die Höhe des Schwingungsdreiecks ist durch parallele Striche in 8 gleiche Teile geteilt. Diese Skalierung erleichtert das Ablesen der jeweiligen Schwingungsamplitude. Auf die zusätzliche Messung der Abklingzeit kann also verzichtet werden. Außerdem umgeht man mit dieser Methode die Schwierigkeit, eine konstante Anfangsamplitude durch exakt gleiches Anschlagen der Stimmgabel zu erzeugen.

SYMNS (1912) kombinierte beide Meßmethoden, indem er mit Hilfe einer mitschwingenden Kontur an den Stimmgabelzinken eine gleichbleibende relative Amplitude definierte, die er dann als Beginn einer Abklingzeitmessung in Sekunden benutzte.

Unabhängig von dem zusätzlich verwendeten Hilfsmittel ist jedoch mit einer Stimmgabel grundsätzlich nur eine Schwellenbestimmung mit abnehmender Amplitude möglich. Nach CLAUSS und EBNER (197o) betrachtet man in der Wahrnehmungspsychologie bei der Bestimmung von Schwellenwerten das arithmetische Mittel aus sechs Einzelmessungen, die mit zu- und abnehmender Schwingungsamplitude gewonnen werden, als besten Schätzwert dieser schwer meßbaren physiologischen Konstante.

Aus diesem Grunde ist also ein Meßverfahren zu bevorzugen, das Schwellenwertbestimmungen sowohl bei Amplitudendekrement als auch bei Amplitudeninkrement erlaubt. Dies ist grundsätzlich mit allen elektrisch betriebenen Vibrationsmeßgeräten möglich. KATZ und NOLDT (1926) benutzten als erste ein derartiges Gerät. V.FREY gab als zweckmäßige Maßeinheit des Vibrationsreizes die Längeneinheit an. Diese kann als Schwingungsamplitude des Vibrators bestimmt werden. Sie steht in direkt proportionalem Verhältnis zur Deformierung der Haut (dem "Antransportorgan" zum Rezeptor, KEIDEL 1956) durch den Vibrationsreiz. Leider ist der Vergleich mit früheren Untersuchungen der VE vorwiegend dadurch erschwert, daß keine Eichung der Amplitude in der Längeneinheit erfolgte bzw. ein anderes Maßsystem verwendet wurde.

GOODFELLOW (1934) benutzte zur Vibrationsschwellenmessung ein in Dezibel geeichtes Audiometer in Kombination mit dem Gault'schen Teletactor. LAIDLAW und HAMILTON (1937) berichten über ein 1929 von Henney konstruiertes Pallaesthesiometer. Sie selbst verwenden ein Gerät, das mit einer Frequenz von 6o Hz arbeitet und die Amplitudengröße in µm ablesen läßt. V.BEKESY (1939) verwendet für seine genauen Messungen verschiedene Apparate. Die Vibrationsstärke gibt er in neper an (1 neper = 8,7 decibel).

Zahlreiche Untersuchungen wurden mit dem sog. Biothesiometer (einem von der Firma Bio-Medical Instrument Co., Newbury/Ohio, hergestellten Pallaesthesiometer) durchgeführt, u.a. von TOOMEY et al. (1949), STEINESS (1957), BERCHTOLD (1967), DUENSING et al. (1975) und ROOS (1977), wobei die Vibrationsschwelle unter Analgetikaeinfluß, bei Diabetes, bei urämischer PNP oder bei Vitamin B12-Resorptionsstörungen untersucht wurde. Nach HÄUSSERMANN (Institut für Biomedizinische Technik in Stuttgart; mündliche Mitteilung) zeigt gerade das zuletzt genannte Gerät bei unterschiedlicher Belastung des Vibrationsstiftes oder unterschiedlicher räumlicher Lage des Vibrators erhebliche Abweichungen von der angezeigten relativen Vibrationsamplitude in Volt.

SCHILLING und BIENER (1959) empfahlen zur Vibrationsmessung erneut die von Otologen verwendeten Audiometer. BISCHOFF (1963) ergänzte bei Patienten mit diabetischer PNP die Stimmgabeluntersuchung durch die Bestimmung der sensiblen Nervenleitgeschwindigkeit.
RITTMANNSBERGER (1967) verwendete für seine Voruntersuchungen zur Schallübertragung auf die Unterarmhaut einen umgebauten Schwingungserreger der Firma Philips, der einen Meßbereich von 2-2ooo µm hat und in der Frequenz von 1-1ooo Hz veränderbar ist.
PERRET und REGLI (197o) benutzten als Vibrator einen umgebauten Lautsprecher. Eine Amplitudeneichung in µm wird nicht angegeben. Vergleichende Untersuchungen mit einem von SCHALTENBRAND entwickelten Apparat (Vibrationsfrequenz 25o Hz, keine Angabe über Amplitudeneichung) und eine 128 Hz Stimmgabel (Messung der Abklingzeit nach möglichst gleichmäßigem Anschlagen) wurden von SEILER und RICKER (1971) durchgeführt. Eine interessante Neuentwicklung eines fest installierten computergesteuerten

und automatisierten übergroßen Gerätes zur Schwellenbestimmung der VE, zusätzlich des Tast- und Berührungssinnes, wurde von DYCK et al. (1978) entwickelt. Das Gerät arbeitet mit einer Vibrationsfrequenz von 25o Hz. Die Amplitude läßt sich in 21 Stufen im Bereich von o,o72 - 296 µm verändern.

3. Eigene Untersuchungen

3.1. Beschreibung der angewendeten Meßmethoden

Die Vibrationsschwelle wurde an 93 Versuchspersonen an 8 symmetrischen Körperstellen erstens mit einer 128 Hz Stimmgabel (nach dem von GRADENIGO angegebenen Verfahren) und zweitens mit einem neuentwickelten elektronischen Vibrationsmeßgerät bestimmt; das Gerät arbeitet ebenfalls mit einer fest eingestellten Frequenz von 128 Hz.
Die Größe des Stimmgabelfußes und der Auflagefläche des Vibrationsstiftes wurden auch angeglichen. Sie beträgt bei einem Durchmesser von 2o mm etwa 314 mm^2. Ein Teil der Untersuchungen wurde mit einem kleineren Vibrationsstiftdurchmesser von 7 mm entsprechend etwa 4o mm^2 Auflagefläche durchgeführt. Bei vergleichenden Messungen konnte keine nennenswerte Änderung der Schwelle durch Veränderung der Auflagefläche in diesem Umfang beobachtet werden.

Bei allen Versuchspersonen wurde die Stimmgabel bzw. das Vibrationsmeßgerät an identischen Körperstellen über darunterliegende Knochenstrukturen aufgesetzt. Infolge der Hautkrümmung kommt jeweils nur ein Teil der planen Vibrator- oder Stimmgabelauflagefläche mit der Haut in Kontakt. Als Meßpunkte wurden die Regionen über den Mittelfingergrundgelenken (MFG) rechts und links, über der Tuberositas tibiae (TT) beidseits, über dem Malleolus medialis (MM) beidseits sowie über den Großzehengrundgelenken (GG) ausgewählt, und zwar wurde stets in gleichbleibender Reihenfolge zuerst an der rechten Hand, dann an der linken Hand, dann sukzessiv nach distal an den Beinen bis zu den GG die Vibrationsschwelle zunächst mit der Stimmgabel und dann mit dem Vibrationsmeßgerät gemessen.

3.1.1. Messung mit der Stimmgabel

Angewendet wurde das von RYDEL und SEIFFER (19o3) in die neurologische Klinik eingeführte Verfahren, wonach die relative Schwingungsamplitude mit Hilfe des Schwingungsdreiecks nach GRADENIGO (wie bereits oben auf Seite 14 beschrieben) geschätzt wird. Hierzu wird die Versuchsperson aufgefordert, sich auf das Schwirren oder Vibrieren zu konzentrieren, das durch die aufgesetzte Stimmgabel hervorgerufen wird. Dann soll der Zeitpunkt, in dem die Schwingung gerade nicht mehr zu spüren ist, durch das Wort "jetzt" angegeben werden. Für die meisten Versuchspersonen stellt die Prüfung der VE eine neue Erfahrung dar. Eine kurze Erläuterung des Geschehens und die demonstrative Unterbrechung der Schwingung durch Berühren der Stimmgabel bewährte sich dabei zur Verbesserung der Selbstbeobachtung und Aufmerksamkeit, was einem Lerneffekt entspricht. Dieser Effekt drückte sich in der Angabe längerer Abklingzeiten durch die Versuchsperson bei wiederholter Messung mit der Stimmgabel aus.

Während der Abklingzeit beobachtet der Untersucher die optische Verwischungsfigur des Schwingungsdreiecks an der Stimmgabelklemme. Als Meßwert wird der bei dem Stichwort "jetzt" erreichte relative Skalenwert notiert. Bei zwei- bis dreimaliger Wiederholung pro Meßpunkt wurde als endgültiger Meßwert stets der höchste angegebene relative Amplitudenwert gemäß der Skalierung verwendet (dies entspricht jeweils der niedrigsten tatsächlichen Schwingungsamplitude). Die so gewonnenen Werte sind in den Tabellen 5, 6 und 7 aufgeführt.

3.1.2. Elektronische Eichung der Stimmgabelskalierung

Das unten beschriebene Vibrationsmeßgerät konnte durch einen geringfügigen Umbau zur Eichung der Stimmgabel verwendet werden. Bestimmt wurden so die der Skalierung des Schwingungsdreiecks entsprechenden tatsächlichen Schwin-

gungsamplituden. Anzumerken ist noch folgendes: RYDEL und SEIFFER (1903) verwendeten zu ihren Untersuchungen eine Stimmgabel mit einer Schwingungsfrequenz von 64 Hz. Diese Frequenz wählten sie aus, weil hierbei die volle Skalenhöhe mit ihren 8 Abstufungen während der Abklingzeit durchlaufen wird. Nachdem bei späteren Untersuchungen der Vibrationsschwellenabhängigkeit jedoch ein Empfindungsoptimum in dem Bereich zwischen 200 und 300 Hz gefunden wurde, werden nunmehr zur klinischen Prüfung der VE meistens 128 Hz Stimmgabeln verwendet. Aus physikalischen Gründen ergibt sich jedoch bei höherer Schwingungszahl auch ein rascheres Abklingen der Schwingung.

Aus denselben Gründen verkürzt sich die vom maximalen Anschlagen der Stimmgabel an durchlaufene Skalierung des Schwingungsdreiecks um drei Teilstriche, so daß zur praktischen Prüfung nur noch vier Teilstriche verbleiben. Diese können mit etwas Übung in 1/4 Stufen abgelesen werden.
Gab die Versuchsperson eine deutlich längere Abklingzeit an, als dem höchsten Skalenwert 8 entsprach, wurde als Meßwert eine 9 notiert.

Bei der elektronischen Messung der Stimmgabel ergaben sich im Mittel die in Tabelle 1 aufgeführten Entsprechungen.

Tabelle 1

Elektronische Amplitudeneichung der verwendeten Stimmgabel in um

Stimmgabel-Skala		Amplitude (µm)
4	entspricht	10,069
5	"	7,108
6	"	4,679
7	"	2,369
8	"	0,888

Da es sich bei der Vibrationsmessung mit der Stimmgabel um einen dynamischen Vorgang handelt, wurde ebenfalls elektronisch die Abklingkurve der verwendeten Stimmgabel bestimmt. Damit läßt sich abschätzen, welcher Meßfehler bei der Stimmgabelmeßmethode durch zeitverzögerte Angaben des Abklingzeitpunktes oder durch verzögerte Ablesung durch den Untersucher zu erwarten ist (Abb. 2 Abklingkurve).

Aus der Abklingkurve (Abb. 2) sind die in Tabelle 2 aufgeführten Abklingzeiten von einem Skalenwert zum nächst höheren zu entnehmen.

Tabelle 2

Abklingzeiten der Stimmgabel (128 Hz)

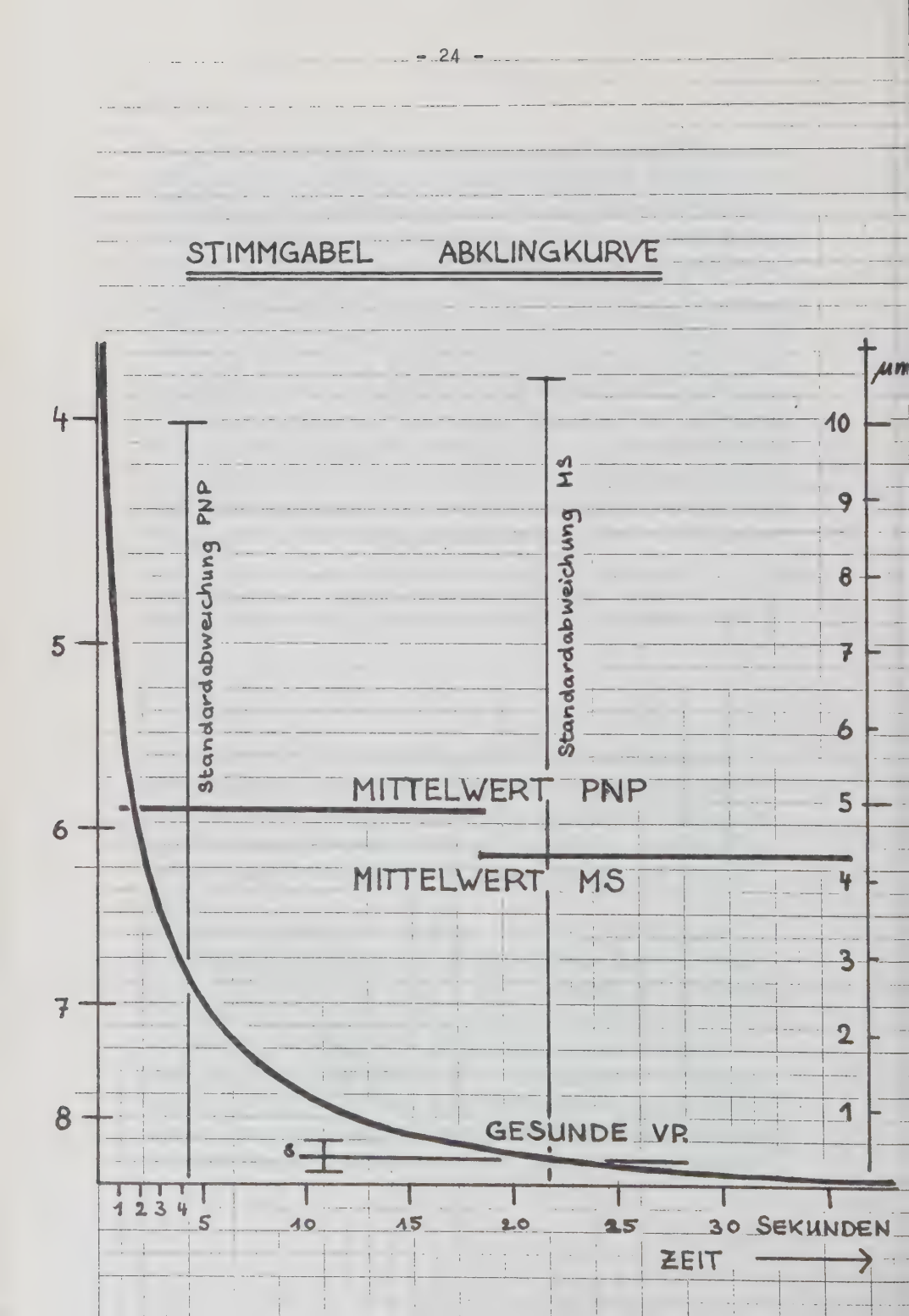
von	Skalenwert	nach	vergehen ca. Zeit (sec)
4	"	5	1
5	"	6	1,1
6	"	7	3,1
7	"	8	7,7

Diese physikalischen Gegebenheiten lassen erhebliche Fehlerbreiten der Stimmgabelmeßmethode erwarten, wie dies auch durch die gleichzeitige apparative Schwellenwertbestimmung nachgewiesen werden konnte. Besonders unbefriedigend sind die Meßmöglichkeiten mit der Stimmgabel

1. in dem Bereich pathologisch erhöhter Vibrationsschwellen, bei denen sich an den unteren Extremitäten meist Skalenwerte zwischen 4 und 7 finden. Bei Versuchspersonen im mittleren Alter bedeutet eine um nur 1 sec verzögerte Zeitangabe im Bereich um den Skalenwert 5 eine Differenz gegenüber der tatsächlichen Schwingungsamplitude von rund 3 µm. Diese Abweichung vom tatsächlichen Wert durch einen derartigen Zeitfehler kann also bereits den etwa 5 bis 1o fachen Betrag der in dieser

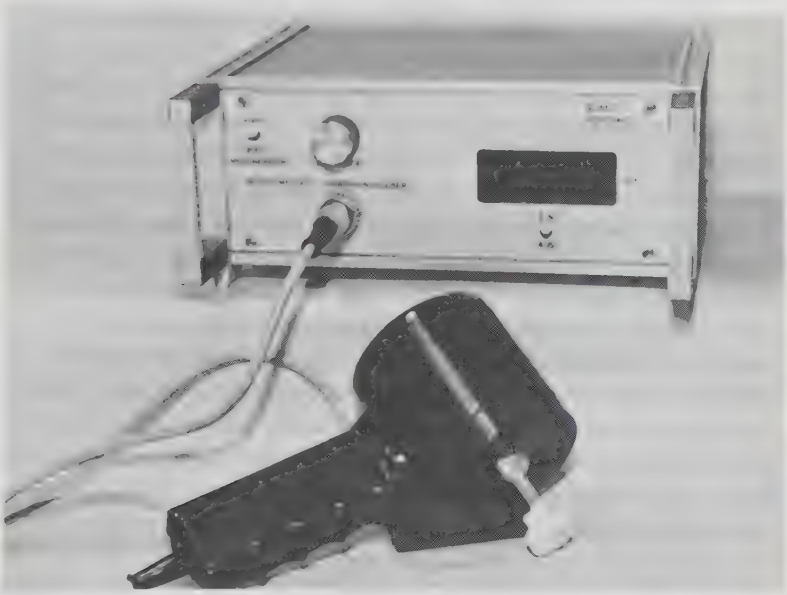
Altersgruppe gefundenen mittleren Vibrationsschwelle bei Gesunden betragen. Schon aus dieser Überschlagsrechnung läßt sich die Schwierigkeit einer Verlaufsbeobachtung bei Vibrationsempfindungsstörungen mit der Stimmgabelmeßmethode allein erkennen.

Zweitens zeigt sich, daß die optische Hilfsmethode nach GRADENIGO in dem Skalenbereich über 8 (entsprechend einer Amplitude von o,888 µm) völlig versagt, so daß differenzierte Aussagen über Vibrationsschwellen mit kleinerer Amplitude, wie sie mit der apparativen Methode z.B. bei den gesunden Kontrollpersonen gefunden wurden, unmöglich sind. Aber auch im mittleren Meßbereich finden sich erhebliche Meßfehler, wie weiter unten gezeigt wird.


STIMMGABEL ABKLINGKURVE
Standardabweichung PNP
Standardabweichung MS
MITTELWERT PNP
MITTELWERT MS
GESUNDE VP.
µm
4
5
6
7
8
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
1 2 3 4 5 10 15 20 25 30 SEKUNDEN
ZEIT

3.1.3. Beschreibung des Vibrationsmeßgerätes

Das verwendete Gerät (s. Foto) wurde am Institut für Biomedizinische Technik in Stuttgart (Leiter Prof. Faust) von Dipl.-Ing. Häussermann entwickelt. In Abb. 3 ist das Blockschaltbild des Vibrationsmeßgerätes dargestellt.



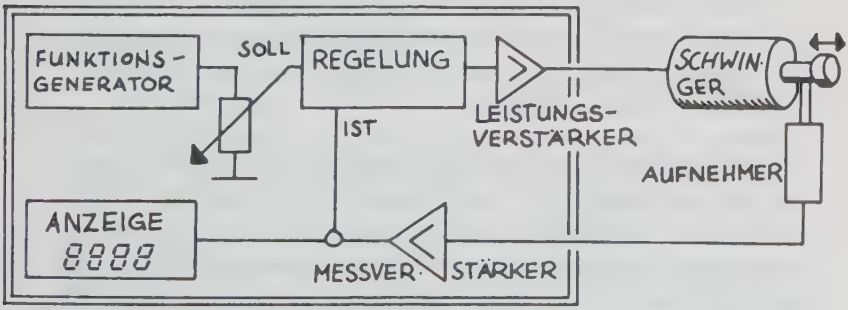


Abb. 3 Blockschaltbild des Vibrationsmeßgerätes

Der Funktionsgenerator erzeugt eine Sinusschwingung mit einstellbarer Amplitude. Da die bisher meist verwendeten Stimmgabeln mit einer Frequenz von 128 Hz arbeiten, ist diese Frequenz fest eingestellt. Über einen Leistungsverstärker wird ein elektromagnetischer Schwinger angesteuert. Bei den bisher klinisch verwendeten elektromagnetischen Schwingern (Vibratoren) ist die Schwingungsamplitude stark vom Auflagedruck abhängig. Deshalb wurde hier erstmals ein geregeltes System entwickelt, das eine vom Auflagedruck unabhängige Schwingungsamplitude liefert. Die Beschleunigung des Schwingers ist bei einer festen Frequenz der Amplitude proportional. Diese Beschleunigung wird mit einem Aufnehmer (Meßfühler) in ein elektrisches Signal umgewandelt, in einem Meßverstärker verstärkt, einer Regelschaltung zugeführt und digital angezeigt. Die Regelschaltung vergleicht den Sollwert mit dem Ist-Wert der Amplitude und steuert entsprechend den Leistungsverstärker. Damit ist gewährleistet, daß am Schwinger unabhängig von Auflagedruck und räumlicher Lage eine konstante Schwingung vorhanden ist. Der digital angezeigte Wert ist der Amplitude proportional und kann mit einem Eichfaktor direkt in einen Amplitudenwert, ausgedrückt in µm, umgerechnet werden.

Die äußeren Bedingungen der apparativen Untersuchung entsprachen der Untersuchung mit der Stimmgabel. Dieselben acht Körperstellen wurden nacheinander und alternierend rechts und links bei jeder Versuchsperson untersucht, und zwar jeweils beginnend mit einem überschwelligen Vibrationsreiz, der dann stufenweise (etwa 1 Stufe pro sec) reduziert wurde, bis das Erlöschen einer VE gemeldet wurde. Ohne den Vibrationsstift in seiner Lage zu verändern, wurde dann die Schwingungsamplitude deutlich reduziert, um sodann erneut (ebenfalls etwa 1 Stufe pro sec) bis zur Angabe einer VE erhöht zu werden. Beide Werte wurden notiert und danach die nächste Körperstelle untersucht.

Ein Absetzen des Vibrators von der Untersuchungsstelle zwischen den einzelnen Meßwertstufen, wie es gelegentlich in der Literatur bei apparativen Untersuchungen zur Vermeidung von Adaptationserscheinungen vorgeschlagen wird, wäre erstens enorm zeitraubend und bedeutete zweitens eine immer wiederkehrende Irritierung der Versuchsperson durch taktile Reize.

Die Handhabung des Vibrationsmeßgerätes ist denkbar einfach. Der Untersucher hält mit der einen Hand den eigentlichen Vibrator an die zu untersuchende Körperstelle, während er mit der anderen Hand den Drehregler für die Amplitudengröße am Steuergerät verändert. Grundsätzlich ist mit dem Vibrationsmeßgerät eine stufenlose Amplitudenänderung möglich. In der praktischen Durchführung ergeben sich jedoch in dem Meßbereich von o,o36 µm bis 12o µm etwa 15o Abstufungen. Im untersten Meßbereich ist die Abstufung gewissermaßen kleinschrittig und beträgt etwa o,o6 µm. Im mittleren Bereich werden die Abstufungen mit o,18 bis o,24 µm schon deutlich größer, um im oberen Bereich 2,o bis 5,o µm zu erreichen (zum Vergleich: bei der Stimmgabel ist durch maximales Anschlagen eine Schwingungsamplitude von etwa 1o µm zu erzielen).

Abb. 4 zeigt die Beziehung von Schaltstufen und der dabei erzielten Schwingungsamplitude sowie die in der vorliegenden Untersuchung gefundenen mittleren Vibrationsschwellen und deren Standardabweichungen über den GG bei gesunden Kontrollpersonen und bei Patienten mit PNP bzw. MS.

In der beschriebenen Weise wurden bei jeder Versuchsperson an acht Körperstellen sechs Einzelmessungen durchgeführt. Das hieraus berechnete arithmetische Mittel (m) wird als Schwellenwert angesehen. Alle so gefundenen Meßwerte sind zusammen mit den Meßwerten der Stimmgabeluntersuchung in den Tabellen 5, 6 und 7 zusammenfassend aufgeführt.

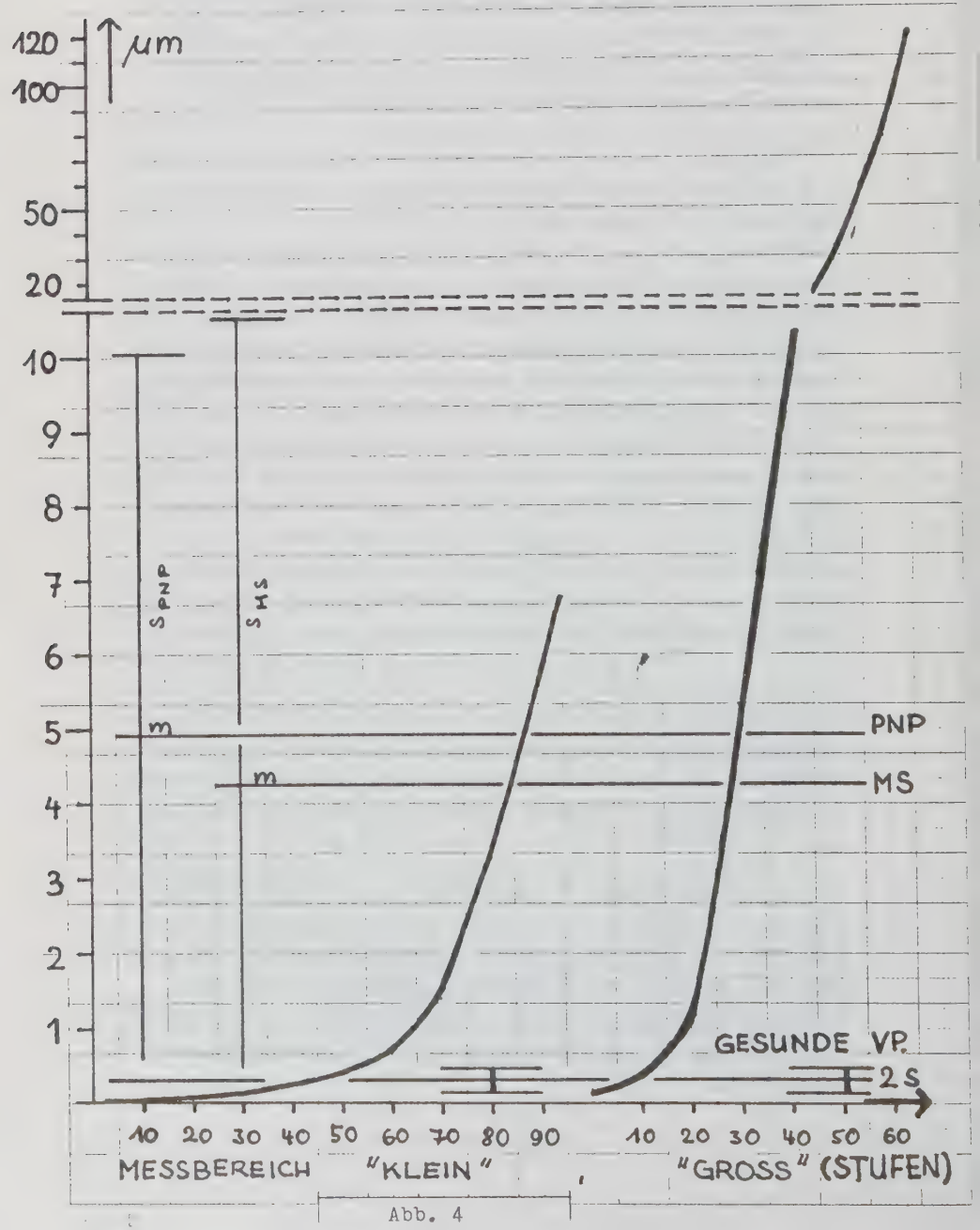

120
100
µm
50
20
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
SPNP
SMS
m
m
PNP
MS
GESUNDE VP.
2 S
10 20 30 40 50 60 70 80 90
10 20 30 40 50 60
MESSBEREICH "KLEIN"
"GROSS" (STUFEN)

Abb. 4

Abb. 5 zeigt das Schema zum Notieren der Einzelwerte mit den Amplitudenangaben einer 35jährigen gesunden Kontrollperson.

Alter:35 gesund	Meßgerät rechts			links			Stimmgabel r	l
MFG ↓	13o	136	13o	1o6	112	118	9	9
↑	1o6	112	136	124	136	1o6		
TT ↓	26o	2o7	195	118	13o	165	8	8
↑	165	2o1	2o1	1o6	2o7	189		
MM ↓	177	88	82	59	47	71	9	9
↑	148	1oo	94	118	94	94		
GG ↓	136	13o	1oo	71	59	77	9	9
↑	159	1oo	94	118	94	88		

Abb. 5 Meßwertschema. Beispiel gesunde Kontrollpersonen

In dem vorliegenden Beispiel finden sich also für jede Körperstelle differierende Einzelwerte, die mehr oder weniger eng um das arithmetische Mittel liegen. Die Streuung ist in diesem Fall sehr gering, was für eine gute Reproduzierbarkeit und somit für die Zuverlässigkeit und Gültigkeit der gefundenen Werte spricht. In pathologischen Fällen beträgt die so gefundene Streubreite ein Vielfaches, was einerseits mit der lupenartigen Meßcharakteristik des Gerätes im unteren Meßbereich bzw. den größeren Abstufungen im höheren Amplitudenbereich zusammenhängt. Gleichzeitig kann diskutiert werden, ob die Wahrnehmungsstörung selbst zur größeren Streuungsbreite der Einzelwerte führt.

Abb. 6 zeigt die Einzelwerte eines 31jährigen Patienten, der wegen des fünften Schubes einer erstmals vier Jahre vorher aufgetretenen MS stationär aufgenommen wurde, mit einer ausgeprägten cerebellären Symptomatik und Verschwommensehen beidseits. Bis auf eine deutliche Minderung der VE fanden sich keine Sensibilitätsstörungen.

Alter: 31 MS		Meßgerät rechts			links			Stimmgabel r	l
MFG	↓	266	3o2	337	432	39o	396	9	9
	↑	29o	331	373	729	444	462		
TT	↓	835	1o66	1125	977	729	13o3	6^{25}	5^{75}
	↑	11o8	1315	151o	1362	924	1984		
MM	↓	1185	17o6	151o	1333	2132	1185	5^{75}	5^{5}
	↑	1475	2132	2179	154o	3222	1475		
GG	↓	2428	29o2	311o	3554	4o28	5271	5^{5}	5^{5}
	↑	29o2	33o5	3832	4993	4916	5597		

Abb. 6 Meßwertschema- Beispiel Multiple Sklerose

3.2. Auswahl der Versuchspersonen

In der vorliegenden Untersuchung werden die an 31 gesunden Kontrollpersonen gefundenen Meßwerte mit den Meßwerten von 31 Patienten mit PNP bzw. mit den Werten von 31 Patienten mit MS verglichen. Einen Überblick über die Gruppengröße, Geschlechts- und Altersverteilung gibt Tabelle 3.

Tabelle 3
Eigene Untersuchungsreihe

Diagnose	Zahl (n)	Geschlecht (mnl.)	(wbl.)	Alter (Jahre)	Mittleres Alter
Gesunde Kontrollpersonen	31	23	8	6-78	36,5
PNP	31	21	1o	24-75	54,o
MS	31	14	17	2o-59	35,5

Tabelle 4 zeigt die unterschiedliche Verteilung in Altersgruppen.

Tabelle 4
Altersverteilung

Altersgruppe (Jahre)	Gesunde Kontrollpersonen (n)	PNP (n)	MS (n)
6-19	5	-	-
2o-29	5	1	12
3o-39	8	5	8
4o-49	7	5	7
5o-59	5	11	4
6o-69	-	5	-
7o-79	1	4	-

Bei den gesunden Kontrollpersonen handelt es sich um Studenten, Klinikpersonal und deren Angehörige und zum Teil um Patienten ohne neurologische Erkrankungen. Die Gruppe der Patienten mit MS umfaßt unterschiedlich schwere Krankheitsbilder. Die Polyneuropathien sind in ätiologischer Hinsicht uneinheitlich (Diabetes mellitus, Alkohol u.a.). Bei allen Patienten wurde in der Neurologischen Klinik des Bürgerhospitals während eines stationären Aufenthaltes mit den üblichen klinischen Verfahren die Diagnose gestellt.
In vier Fällen von PNP zeigte das EMG und die Bestimmung der motorischen Nervenleitgeschwindigkeit keinen Hinweis auf eine (motorische) PNP bei sonst typischer Konstellation mit distal strumpfförmig begrenzten Sensibilitätsstörungen und Abschwächung des Achillessehnenreflexes.
Die Diagnose einer MS stützte sich auf die Kenntnis der Anamnese, auf den neurologischen Befund, die entzündliche Liquorkonstellation mit Nachweis intrathekaler IgG-Bildung sowie pathologische Befunde bei der Untersuchung visuell evozierter kortikaler Potentiale.

Da ausreichende Aufmerksamkeit und Motivation zur Mitarbeit sowie eine gute Selbstbeobachtung der Versuchsperson wichtige Voraussetzungen für verläßliche Ergebnisse darstellen, wurden nur solche Patienten zur Untersuchung herangezogen, die in psychischer Hinsicht bewußtseinsklar und allseits orientiert waren und keine Hinweise auf eine hirnorganische Leistungsminderung boten.

3.3. Meßergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen 5, 6 und 7 sind die für die jeweils acht untersuchten Körperstellen mit der Stimmgabel und mit dem Vibrationsmeßgerät festgestellten Schwellenwerte aufgelistet. Die Tabellen sind nach Gruppenzugehörigkeit unterteilt und jeweils nach dem Alter geordnet.
In Tabelle 8 sind Mittelwerte und Standardabweichungen für die acht Meßpunkte der apparativen Schwellenbestimmung für die jeweiligen Altersgruppen dargestellt.
In den Tabellen sind zur Vereinfachung der Schreibweise und zur Verbesserung der Übersichtlichkeit die Amplituden in nm=$1o^{-3}$ µm = $1o^{-9}$m angegeben.

Tabelle 5 Meßwerte Vergleichskollektiv (s. Text)

	GROSSZEHENGG.				MALLEOLUS MED.				TUBEROSITAS TIB.				MITTELFINGERGG.			
	R		L		R		L		R		L		R		L	
ALTER	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.	APP.	ST.
6	65	9	71	9	82	8	88	9	77	9	71	9	59	9	53	9
12	171	9	142	9	165	8	171	8	112	8	154	8	106	8	59	9
17	112	9	71	9	59	9	88	9	112	9	118	9	59	9	65	9
18	136	9	154	9	112	9	130	9	189	9	219	9	100	9	136	9
18	71	9	53	9	41	9	59	9	47	9	47	9	94	9	100	9
22	343	7 5	349	7 5	171	7 25	154	7 25	183	7 5	177	7	142	8	142	8
26	189	9	65	9	100	9	142	9	219	9	165	9	148	9	148	9
27	165	8	177	8	124	7 75	142	7 75	130	8	118	8	71	9	65	9
28	248	8	201	8	106	8	195	8	142	8	100	8	94	9	100	9
28	159	8	231	8	94	8	100	8	106	8	142	8	77	9	59	9
31	189	8	154	8	154	8	154	8	177	8	177	8	159	9	148	9
32	177	8	189	8	94	8	71	8	100	9	47	9	77	9	65	9
33	82	9	53	9	77	9	130	9	130	9	112	9	106	9	94	9
34	112	9	106	9	106	8	118	8	124	8	118	8	154	9	159	9
35	118	9	82	9	118	9	82	9	207	8	154	8	124	9	118	9
37	308	8	325	8	106	9	112	9	171	8	159	8	94	9	100	9
37	142	9	171	9	130	9	106	9	136	9	124	9	77	9	82	9
38	148	8	177	8	177	8	159	8	450	7 75	361	7 5	118	8	171	8
40	88	9	71	9	94	9	47	9	106	9	82	9 75	94	9	41	9
40	159	8 25	367	8	189	7 5	183	7 5	236	7 75	231	7 75	100	8	94	8
41	509	7 25	331	8	248	8	290	6 75	189	8	231	8	189	8	148	8
46	302	8	373	8	118	8	136	8	118	9	171	9	118	9	165	9
46	148	9	236	9	177	9 5	118	9 5	254	9 25	189	9 25	106	9	148	9
47	367	8	225	8	118	7 5	165	7 5	219	7 25	219	7 25	165	9	177	9
48	450	8 5	438	8 5	272	7 5	278	8	349	8	266	8	260	9	231	9
50	723	7 5	883	7 5	633	7	687	7	687	8	497	8	438	8	438	8
51	835	8	1 001	8	811	8	663	8	811	8	669	8	450	8	450	8
51	438	6 75	367	6 75	242	7	444	6 75	308	6 5	242	7	219	8	189	8
56	219	9 5	130	9 75	154	9	142	9 25	136	9 5	171	9 75	242	9	266	9
58	1 315	6 25	1 297	6 5	533	6 75	622	6 25	497	6 5	509	6 5	325	8	325	8
78	2 002	6	1 125	7 5	1 220	5 75	1 285	6 25	2 340	6	1 724	6 5	379	8	432	8

Tabelle 6 POLYNEUROPATHIE

ALTER	GROSSZEHENGG. R APP.	GROSSZEHENGG. R ST.	GROSSZEHENGG. L APP.	GROSSZEHENGG. L ST.	MALLEOLUS MED. R APP.	MALLEOLUS MED. R ST.	MALLEOLUS MED. L APP.	MALLEOLUS MED. L ST.	TUBEROSITAS TIB. R APP.	TUBEROSITAS TIB. R ST.	TUBEROSITAS TIB. L APP.	TUBEROSITAS TIB. L ST.	MITTELFINGERGG. R APP.	MITTELFINGERGG. R ST.	MITTELFINGERGG. L APP.	MITTELFINGERGG. L ST.
24	1 919	6^{75}	1 934	6^{75}	1 262	6^{25}	1 131	6^{5}	1 191	6^{5}	871	6^{5}	793	8	580	8
31	385	7^{25}	722	7_{25}	325	7^{25}	313	7_{5}	260	8_{75}	302	7^{25}	266	8	236	8
33	1 990	6^{25}	2 760	6^{25}	1 350	6^{75}	1 350	6^{5}	1 084	6^{75}	1 167	6^{75}	479	8	438	8
36	9 317	5_{5}	7 818	4^{5}	1 670	5^{5}	2 523	5^{25}_{25}	977	5^{5}_{5}	675	6^{0}_{5}	402	8	390	8
38	9 862	5^{5}	9 240	6_{5}	687	6_{5}	711	6^{5}	764	6^{5}	634	6^{5}	373	9	420	9
39	420	7^{5}	467	7^{5}	254	7^{5}	213	7^{5}	343	7^{5}	165	8	379	8	331	8
41	4 862	5^{75}_{5}	5 911	6^{5}_{75}	1 771	6^{25}	2 144	6^{5}_{25}	2 103	6^{25}	2 008	5^{75}_{25}	1 658	6^{5}	1 670	6^{25}
44	1 646	6^{5}	1 422	7^{75}	776	7	859	7^{25}	894	7	1 184	7^{25}	438	7	367	8
44	675	7^{5}	782	7^{75}	444	6^{75}	1 256	7	444	7	592	7	242	8	231	8
49	3 015	6	3 240	6_{25}	201	6^{5}	521	6^{5}	195	6^{75}	207	7_{25}	183	8	112	8
49	2 683	6_{75}	2 517	6^{75}	888	6_{75}	965	7_{75}	622	7	568	6^{25}	479	8	408	9
52	788	6^{75}	622	6^{75}	278	6^{75}	284	6^{75}	290	7	225	7	154	9	130	9
54	18 184	5_{25}	13 356	5^{25}_{25}	3 808	6_{75}	3 222	6	1 842	6^{25}_{25}	1 481	5^{75}_{0}	634	7^{25}	574	7^{75}
56	3 062	5^{25}	3 921	5^{25}	1 214	5^{75}	2 719	5	924	6^{25}_{5}	1 481	6^{0}	835	8	652	6
57	18 776	-	9 192	-	6 971	-	14 630	-	2 085	5^{5}	3 637	-	231	9	254	9
57	4 342	6^{5}	4 786	6^{5}	2 683	6^{75}	3 536	6	2 612	7_{5}	2 482	6_{5}	912	8_{5}	829	9_{5}
57	1 173	7	1 161	7	687	7_{25}	1 131	7_{5}	396	7^{75}_{5}	770	7^{75}	248	7^{5}	420	7^{5}
58	18 243	-	20 807	-	5 360	5^{25}	5 882	4^{5}	2 849	5^{75}	3 175	5^{75}	3 743	6	3 435	6
58	977	6^{75}_{5}	1 676	5^{75}_{5}	467	6^{25}_{75}	687	6_{75}	414	6	604	6^{25}	361	7^{5}	319	7^{5}
59	3 808	5^{5}	2 221	5^{5}	361	6^{5}_{5}	604	6^{75}	213	8	260	8^{75}	148	9	100	9
59	2 221	6	1 161	7	1 191	6^{5}	1 250	7	467	7	402	6^{75}	266	8	189	8
59	4 087	7^{5}	5 905	7^{5}	2 481	6^{5}_{25}	2 950	6^{5}_{25}	1 605	6_{5}	2 695	6	693	9	1 273	9
63	16 969	-	24 136	-	4 093	4^{25}	4 176	4^{25}	1 570	5^{5}	1 735	5	165	9	130	9
64	über 120 000			-	-	-	-	-	-	-	-	-	800	8	936	8
64	30 800	4_{25}	21 027	4_{5}	3 092	5^{5}	3 731	5^{5}_{75}	2 369	5_{5}	1 540	7_{5}	420	9	379	9_{5}
67	3 210	6^{25}	2 956	6^{5}	1 747	7	1 641	6^{75}	1 131	6^{5}	1 297	6^{5}_{5}	1 789	7	1 735	6^{5}
69	15 477	-	29 425	-	1 694	6	3 329	6	640	7	1 584	6^{5}	592	8	628	8
72	1 345	8_{5}	1 196	8	1 333	7^{5}_{25}	1 676	7_{25}	1 114	7^{5}_{25}	1 653	7_{5}	888	8	1 031	8
72	3 554	6^{5}	3 293	7_{5}	1 830	6^{25}_{5}	3 495	6^{25}	568	6^{0}	912	6^{75}_{5}	319	9	278	9
73	5 627	5	4 276	5^{5}	3 808	5^{5}	3 530	5^{5}	1 457	6^{0}	4 205	5^{5}	77	9	302	8

Tabelle 7 MULTIPLE SKLEROSE

ALTER	GROSSZEHENGG. R APP.	GROSSZEHENGG. R ST.	GROSSZEHENGG. L APP.	GROSSZEHENGG. L ST.	MALLEOLUS MED. R APP.	MALLEOLUS MED. R ST.	MALLEOLUS MED. L APP.	MALLEOLUS MED. L ST.	TUBEROSITAS TIB. R APP.	TUBEROSITAS TIB. R ST.	TUBEROSITAS TIB. L APP.	TUBEROSITAS TIB. L ST.	MITTELFINGERGG. R APP.	MITTELFINGERGG. R ST.	MITTELFINGERGG. L APP.	MITTELFINGERGG. L ST.
20	28 804	4_{75}	25 072	5^{75}_{25}	6 397	3_{75}	6 847	5^{5}_{0}	3 927	6_{5}	3 767	6_{5}	864	9	1 150	9_{5}
22	604	6^{75}	1 943	7^{75}	515	6^{75}	734	6^{75}	557	6^{75}	1 179	5^{75}	409	8	1 427	7^{5}
23	21 489	6	19 676	5^{75}	699	5^{75}	1 866	5^{25}	1 528	6^{75}	1 836	5^{75}	231	8	302	8
25	4 407	5^{25}	4 158	5^{75}	2 476	5^{75}_{5}	3 939	5^{25}_{5}	1 795	5^{5}	1 812	5^{75}	421	6	261	7^{5}
26	3 335	6_{75}	3 465	6_{0}	1 783	6^{5}	1 735	6^{5}_{5}	4 395	6_{25}	960	7_{25}	65	9	65	9
27	1 812	6^{75}	1 789	7^{0}	900	6	1 013	6^{5}	936	6^{25}	965	6^{25}	705	8	669	8
28	622	7^{75}	604	7^{75}	296	7^{5}_{25}	432	7^{5}	479	6^{5}_{5}	426	7^{0}_{25}	308	8_{75}	355	8_{75}
28	120 000	-	120 000	-	8 223	6^{25}	10 383	5_{5}	11 668	5^{5}	11 550	5^{25}	450	7^{75}	509	7^{75}
28	254	8	420	7	88	8	88	7^{5}	118	8	71	8	71	9	82	9
29	1 208	6^{5}	1 629	6^{75}_{5}	1 528	6^{25}_{25}	817	6^{5}	2 103	7_{5}	1 629	7_{75}	106	9	82	9
29	1 196	7_{5}	1 356	6^{5}	693	6^{25}	788	6^{25}	509	6^{5}	544	6^{0}	136	8_{5}	148	7_{5}
29	776	6^{5}	652	6^{5}	544	6^{5}	503	6^{5}	610	6^{5}	776	7^{0}	402	6^{5}	367	6^{5}
31	604	8_{5}	604	8_{5}	319	6^{5}_{75}	432	6^{5}_{5}	302	7_{25}	337	7_{75}	142	9	154	9
31	3 080	5^{75}	4 727	5^{5}	1 670	5^{75}	1 818	5^{5}	1 161	6^{25}	1 208	5^{5}	319	9	479	9
31	509	6^{75}	539	6^{5}	302	7	456	6^{5}	610	6^{25}	557	5^{5}	118	9	118	9
32	355	7^{75}	225	7^{75}_{5}	201	7^{5}_{75}	207	7^{25}_{5}	213	7_{5}	207	7^{5}_{75}	195	8	183	8
33	438	7	420	6^{5}_{5}	308	6^{75}	414	6^{5}_{5}	450	6^{5}	462	6^{75}	154	8	171	8
33	385	8	444	7^{5}	343	8	450	7^{5}	195	8	254	8	195	9	159	9
36	711	7^{25}	752	7	503	7_{75}	681	6^{75}	550	7_{5}	586	7_{75}	313	9	414	9
36	693	7	734	8_{25}	580	6^{25}_{25}	491	8_{25}	734	7^{5}	479	7^{75}	681	9_{25}	284	9^{25}_{25}
43	1 457	6	1 368	6^{25}	652	6^{25}	770	6^{25}	687	6	675	6	130	7^{25}	130	7^{25}
43	723	8	800	8	420	7^{5}	414	7^{5}	390	7_{25}	343	7	296	9	278	9_{25}
44	4 999	-	9 096	-	2 130	-	5 005	-	1 653	6^{25}_{25}	3 868	-	367	9	1 730	7^{25}
44	2 024	6^{5}	3 631	6^{75}	1 386	6^{5}	2 002	6^{5}	1 226	6^{25}	1 220	6	1 007	8	989	8
45	705	6^{75}_{25}	456	7_{75}	302	6^{75}_{25}	308	6^{5}_{5}	313	6^{25}	290	6^{5}	165	9_{5}	136	9
46	1 345	6^{5}	948	6^{5}	906	6^{5}	1 007	6^{5}	983	7	971	7_{5}	313	7^{5}	296	9
49	2 334	6^{5}	930	7^{5}	473	6^{5}	284	7^{5}	456	9	533	7^{5}	236	9	189	9
50	6 308	5^{5}	3 660	5	1 451	6^{75}	1 647	4^{5}_{25}	888	7_{5}	2 334	6^{5}_{25}	343	9	622	9
50	4 217	7_{75}	13 149	6	1 303	7_{75}	1 895	6^{5}	355	6^{75}	610	6^{75}	207	9	337	8
51	4 004	6^{75}	4 519	7	1 427	6^{75}	1 570	6^{5}	758	6^{75}	1 030	6^{75}	284	9	284	9
59	35 271	-	26 565	-	10 691	7	7 611	7	640	7^{75}	379	7^{75}	473	8	503	8

ALTERSGRUPPEN - MITTELWERTE - STANDARDABWEICHUNGEN

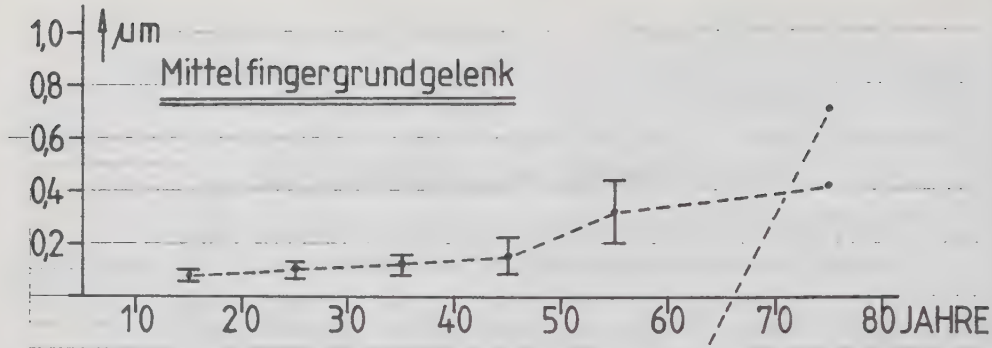
		GROSSZEHENGG.		MALLEOLUS MED.		TUBEROSITAS T.		MITTELFINGER-	
		m	s	m	s	m	s	m	s
6-19 J.									
Gesund	R	111	45	92	49	108	30	84	23
	L	98	41	108	44	122	37	82	35
PNP		-	-	-	-	-	-	-	-
MS		-	-	-	-	-	-	-	-
20-29 J.									
Gesund	R	222	77	120	31	148	42	106	36
	L	205	102	147	34	130	19	103	42
PNP		1 919	-	1 262	-	1 190	-	793	-
		1 934	-	1 131	-	870	-	580	-
MS		5 800	9 753	2 013	2 597	2 385	3 228	444	367
		3 472	8 779	2 429	3 151	2 126	3 118	574	576
30-39 J.									
Gesund	R	160	69	121	33	187	112	114	32
	L	158	84	117	31	157	92	118	40
PNP		4 400	4 789	858	492	686	370	380	76
		4 208	4 073	1 022	951	585	388	364	82
MS		847	1 056	537	619	527	511	265	245
		912	1 493	486	519	320	313	187	134
40-49 J.									
Gesund	R	290	161	174	68	211	83	148	61
	L	292	124	174	75	207	73	144	61
PNP		2.577	1 574	816	599	852	744	601	605
		2 774	1 995	1 149	615	912	706	558	633
MS		2 027	1 501	892	674	816	496	360	297
		2 661	3 115	1 399	1 699	1 129	1 253	536	605
50-59 J.									
Gesund	R	706	417	481	278	488	274	335	107
	L	736	477	512	227	418	206	334	112
PNP		7 040	7 505	2 313	3 354	1 245	986	748	1 031
		5 892	6 309	2 233	4 091	1 544	1 169	744	959
MS		12 450	15 250	3 718	4 649	660	227	329	115
		11 975	10 628	3 181	2 957	1 088	873	437	157
60-69 J.									
Gesund	R	-	-	-	-	-	-	-	-
	L								
PNP		25 137	21 419	13 971	25 320	1 427	750	753	81
		27 355	20 409	14 421	25 267	1 527	179	762	620
MS		-	-	-	-	-	-	-	-
70-79 J.									
Gesund	R	2 002	-	1 220	-	2 340	-	379	-
	L	1 125	-	1 285	-	1 724	-	432	-
PNP		6 262	5 779	2 411	1 083	1 373	748	465	348
		5 223	4 777	3 857	2 101	2 227	1 412	579	359
MS		-	-	-	-	-	-	-	-

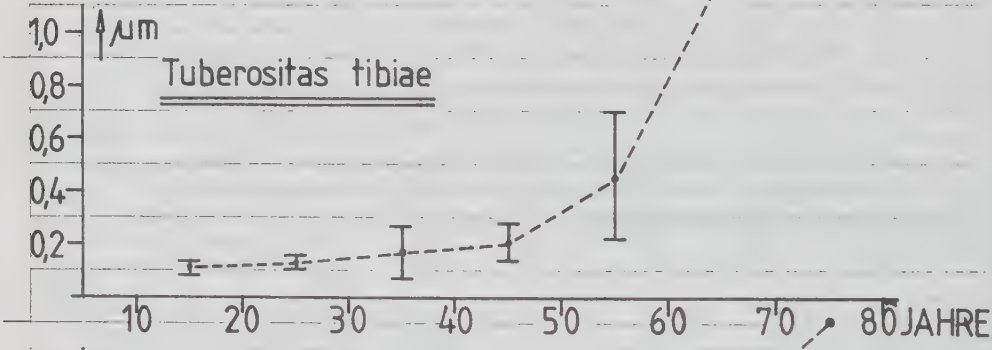
Tabelle 8

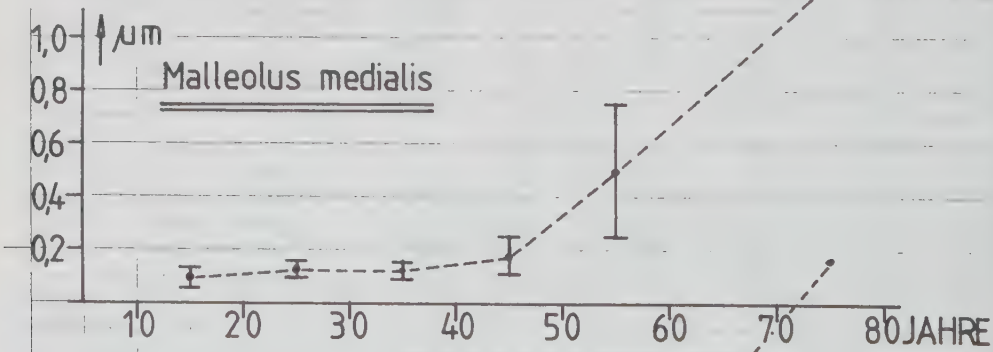
4. Auswertung

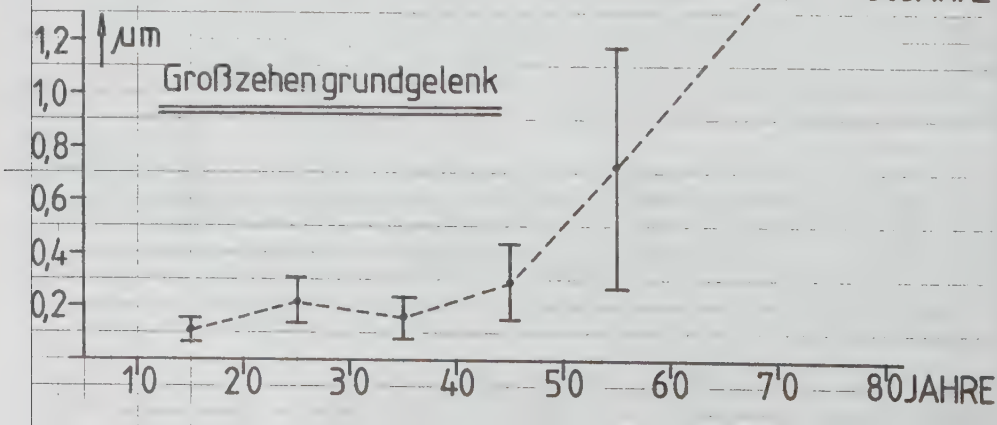
4.1. Altersabhängigkeit der Vibrationsschwelle

Aus Voruntersuchungen (PEARSON, 1929; STEINESS, 1957; PERRET und REGLI, 197o; SEILER und RICKER, 1971) ist ein Anstieg der Vibrationsschwelle mit zunehmendem Alter bekannt. PERRET und REGLI (197o) konnten nachweisen, daß in ihrem Untersuchungsgut die Schwellen an den Füßen vergleichsweise stärker als an den Händen mit zunehmendem Alter ansteigen. Diese Befunde spiegeln sich auch in der vorliegenden Untersuchung wider. Die nachfolgende Abb. 7 veranschaulicht die Altersabhängigkeit der Vibrationsschwelle bei neurologisch gesunden Kontrollpersonen.


µm
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
Mittelfingergrundgelenk
1'0
2'0
3'0
4'0
5'0
6'0
7'0
8'0
JAHRE


µm
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
Tuberositas tibiae
1'0
2'0
3'0
4'0
5'0
6'0
7'0
8'0
JAHRE


µm
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
Malleolus medialis
1'0
2'0
3'0
4'0
5'0
6'0
7'0
8'0
JAHRE


µm
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
Großzehengrundgelenk
1'0
2'0
3'0
4'0
5'0
6'0
7'0
8'0
JAHRE

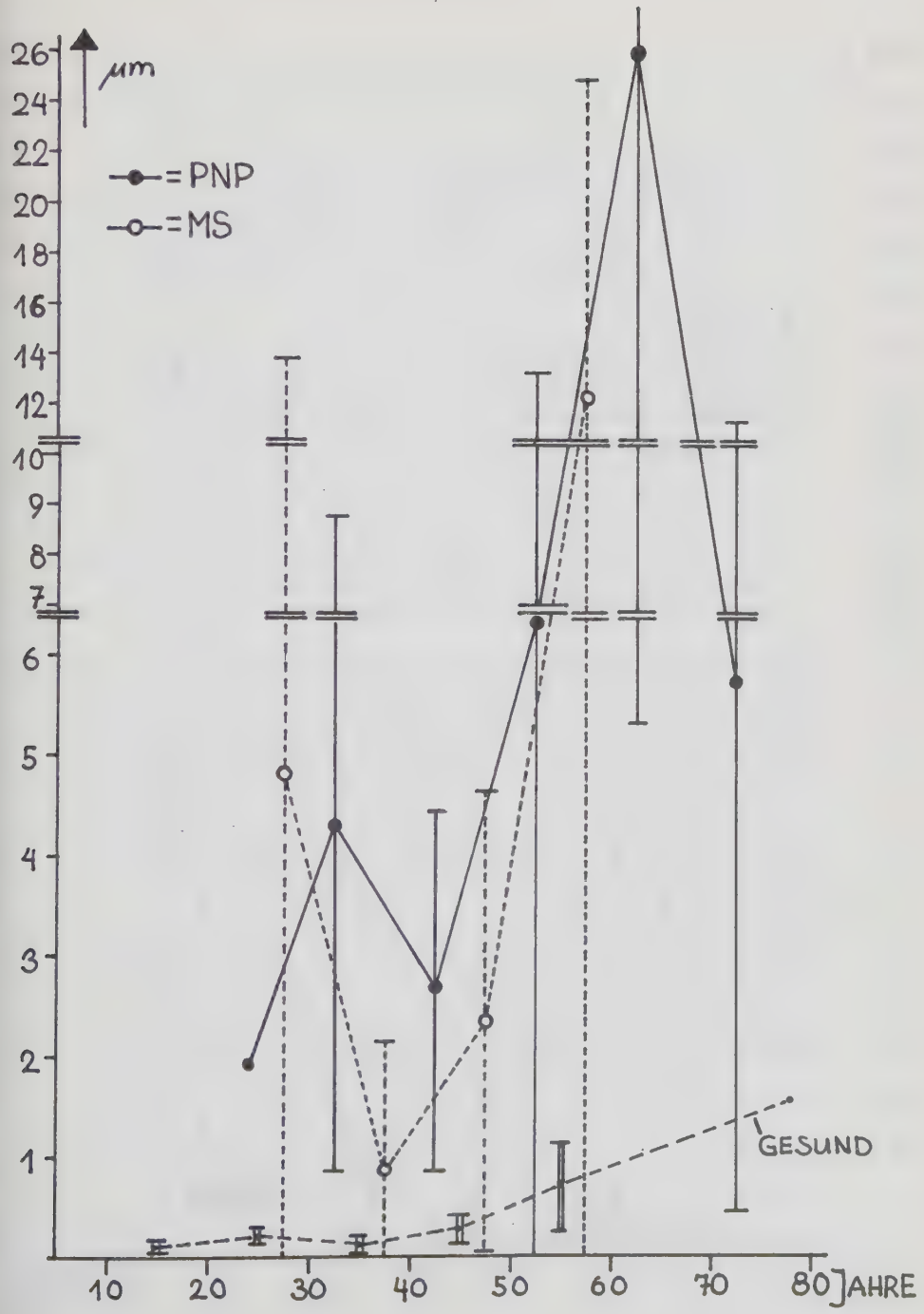
4.2. Gruppenvergleich zwischen Gesunden und Patienten

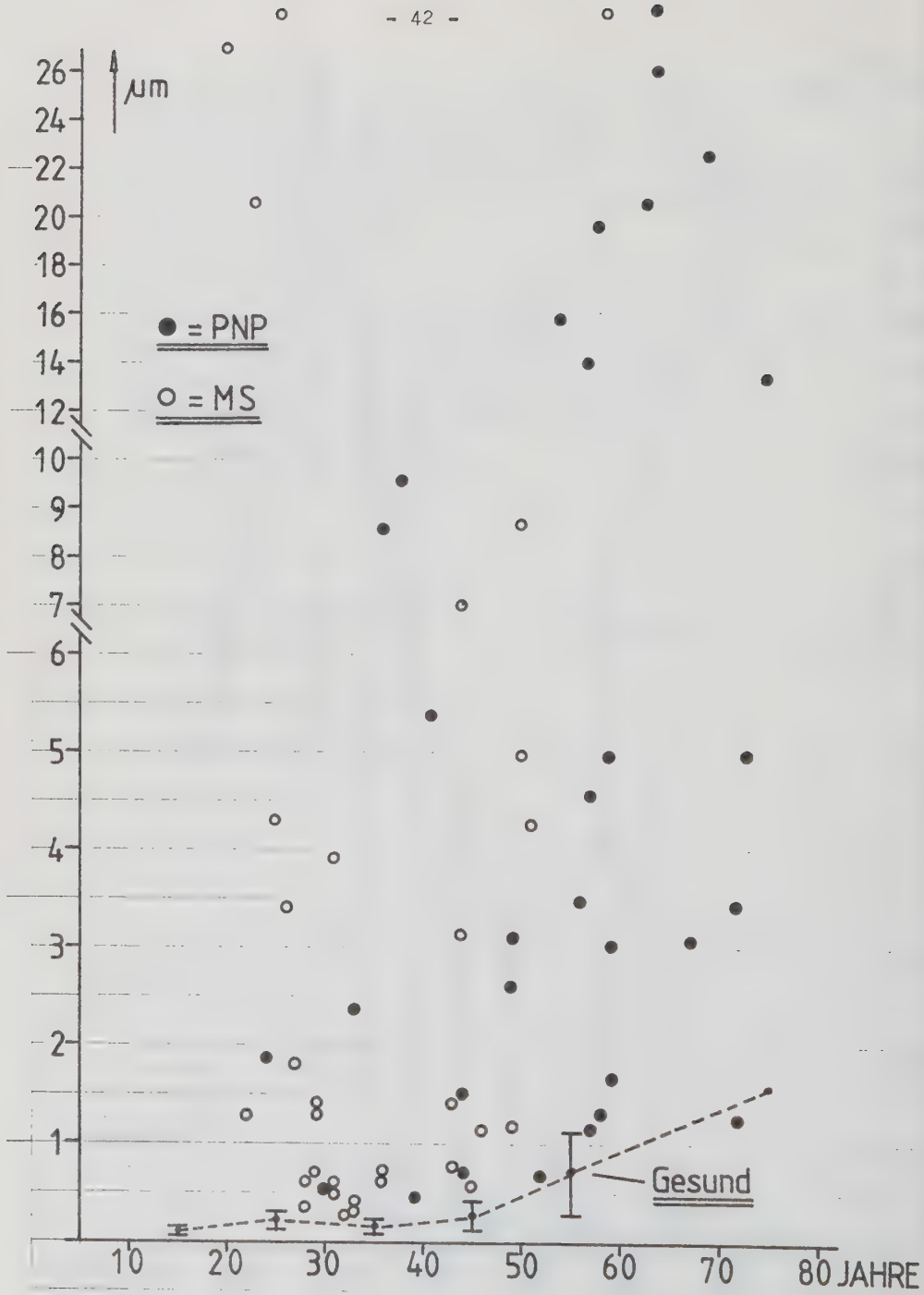
Der statistische Gruppenvergleich zeigt (ohne Berücksichtigung der Altersgruppen) einen signifikanten Unterschied zwischen gesunden Kontrollpersonen und Patienten mit PNP einerseits und MS andererseits. Zwischen den Patientengruppen mit PNP bzw. MS sind hinsichtlich der Vibrationsschwelle keine signifikanten Unterschiede nachweisbar. Aufgrund der relativ kleinen Untergruppen bei Einteilung in Altersgruppen läßt sich auch zwischen Gesunden und Patienten mit PNP bzw. MS kein signifikanter Unterschied nachweisen.
Dies ändert sich, wenn man hypothetisch größere Fallzahlen von z.B. 3o Untersuchten pro Altersgruppe oder sogar eine Normalverteilung mit den hier gefundenen Mittelwerten und Standardabweichungen für alle drei Gruppen einsetzt. Dieses Vorgehen erscheint bei der großen Zahl von Voruntersuchungen, die sämtlich zu entsprechenden Ergebnissen kamen, gerechtfertigt.

Leider sind die von anderen Autoren mit apparativen Meßmethoden festgestellten Werte meist nicht direkt vergleichbar, weil eine Eichung der Schwingungsamplitude in der Längeneinheit nicht durchgeführt wurde oder aber etwas unterschiedliche Körperstellen untersucht wurden. Es läßt sich jedoch mit großer Wahrscheinlichkeit voraussagen, daß mit Hilfe der hier angewendeten standardisierten Untersuchungsmethode eine zuverlässige und objektive altersbezogene Normverteilung erstellt werden kann. Diese Normverteilung kann dann wiederum zuverlässig zur Abgrenzung pathologischer Funktionsstörungen herangezogen werden.

Die nachfolgende Abb. 8 veranschaulicht die in Tabelle 8 zusammengefaßten altersgruppenbezogenen Mittelwerte und Standardabweichungen, wie sie bei den Patienten mit PNP und MS sowie bei den gesunden Kontrollpersonen über den GG gefunden wurden.

Abb. 9 zeigt noch einmal die altersgruppenbezogenen Mittelwerte und Standardabweichungen der Vibrationsschwelle bei gesunden Kontrollpersonen sowie die bei Patienten mit PNP bzw. MS gefundenen Einzelwerte in bezug zum Alter bei Messung über den GG.


µm
26
24
22
20
18
16
14
12
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
= PNP
= MS
GESUND
10
20
30
40
50
60
70
80
JAHRE


µm
26
24
22
20
18
16
14
12
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
● = PNP
○ = MS
Gesund
10
20
30
40
50
60
70
80 JAHRE

Wie einfache Zahlenvergleiche in Tabelle 7 erkennen lassen, ist die Vibrationsschwelle bei der pathologischen Funktionsstörung jeweils über den GG am deutlichsten erhöht. Die distale Betonung von Vibrationsempfindungsstörungen versucht man im Hinblick auf die größere Länge der Leitungsbahnen und der damit zusammenhängenden größeren Wahrscheinlichkeit von Läsionen auf dieser Wegstrecke zu erklären.

Bei der klinisch üblichen Untersuchungsmethode mit Stimmgabel wird die wenig exakte Bestimmung der relativen Schwingungsamplitude (z.B. nach dem Verfahren von GRADENIGO) dadurch zu verbessern versucht, daß man die VE vom Patienten an mehreren Körperstellen durch rasches Umsetzen der weiterschwingenden Stimmgabel miteinander vergleichen läßt. Dies führt zwar zu einer etwas größeren Meßgenauigkeit, andererseits vergrößert sich aber auch hierdurch der Zeitaufwand.

Wie oben ausgeführt, lassen sich mit der hier skizzierten apparativen Meßmethode gut reproduzierbare und zuverlässige Schwellenwerte für alle Körperstellen finden. Es ist zweckmäßig, sich auf die Untersuchung nur einer Körperstelle zu konzentrieren, die erfahrungsgemäß am frühesten von einer Funktionsstörung betroffen ist. Hierfür bietet sich dann natürlich eine standardisierte Schwellenbestimmung an den Füßen und da wiederum speziell an den GG an. Insbesondere ist so eine verbesserte Beurteilung von sensiblen Reizleitungsstörungen im peripheren Nervensystem zu erwarten (wie z.B. bei der PNP), so daß man dann häufig auf die sonst wünschenswerte elektrische Bestimmung der sensiblen Nervenleitgeschwindigkeit verzichten kann.

4.3. Vergleich der verwendeten Meßmethoden

Erwartungsgemäß spiegeln sich in der vorliegenden Untersuchung die erheblichen Mängel der Stimmgabelmeßmethode wider. Wie sich bei verfeinerter Meßtechnik zeigt, spielt die Beobachtungsgabe und Aufmerksamkeit des Untersuchten selbst bei dem Bemühen um ein objektives Verfahren eine ungebührlich große Rolle.

Gerade die oben beschriebene Abklingkurve der in der neurologischen Klinik meist verwendeten Stimmgabel mit einer Frequenz von 128 Hz zeigt einen ausgesprochen ungünstigen Verlauf, so daß schon um Sekundenbruchteile verzögerte Angaben der Versuchsperson zwangsläufig zu einer großen Fehlerbreite führen müssen.

In der vorliegenden Untersuchung werden die elektronisch gemessenen Stimmgabelamplituden mit den Angaben der Untersuchten bei der ebenfalls elektronisch apparativen Vibrationsmessung verglichen. Voraussetzung für die Zulässigkeit eines solchen Vergleiches ist, daß das Meßgerät selbst zuverlässige Werte liefert, was durch die oben beschriebene Regelschaltung gewährleistet ist. Außerdem spricht die gute Reproduzierbarkeit der Vibrationsschwelle bei wiederholter Einzelmessung an derselben Körperstelle auch zu unterschiedlichen Tageszeiten oder an verschiedenen Tagen für die gute Objektivität der angewendeten Methode.

Unter den genannten Voraussetzungen ist nun ein direkter Vergleich zwischen Stimmgabelmessung und apparativer Messung möglich. Man erhält so eine biologische, empirische "Eichung" der Stimmgabelskala, die jedoch eine erhebliche Streubreite und Standardabweichung der Einzelwerte vom Mittelwert aufweist.
In Tabelle 9 sind die entsprechenden Werte zusammengefaßt (in Klammern jeweils die zugehörige tatsächliche Schwingungsamplitude).

SKALENWERT (UND GEMESSENE AMPLITUDE)	MITTEL	S	STREUBREITE	
5 (= 7.12 µm)	6.66	3.75	2.52	13.36
	7.38	4.17	3.66	11.55
5.5 (= 5.89 µm)	3.33	2.54	0.98	9.86
	4.65	3.31	1.18	11.67
5.75 (= 5.25 µm)	2.69	1.33	1.21	4.86
	7.95	10.02	1.21	25.07
6 (= 4.68 µm)	2.74	2.02	0.41	9.24
	4.53	6.09	0.42	21.49
6.25 (= 4.10 µm)	1.66	0.96	0.47	3.50
	2.12	1.91	0.31	8.22
6.5 (= 3.52 µm)	2.37	2.38	0.21	12.12
	0.94	0.69	0.30	2.62
6.75 (= 2.95 µm)	0.98	0.72	0.20	2.68
	1.21	1.02	0.30	4.00
7 (= 2.37 µm)	1.11	0.75	0.21	3.29
	1.59	2.73	0.15	10.69
7.25 (= 2.00 µm)	0.62	0.35	0.32	1.18
	0.60	0.70	0.13	1.94
7.5 (= 1.63 µm)	1.08	1.58	0.25	5.91
	0.47	0.44	0.09	1.43
7.75 (= 1.25 µm)	0.93	0.44	0.57	1.42
	0.61	0.44	0.23	1.73
8 (= 0.89 µm)	0.51	0.32	0.11	1.35
	0.41	0.28	0.07	1.01
9 (= ?)	0.36	0.30	0.08	1.27
	0.31	0.26	0.07	1.15

Tabelle 9 Empirische "Eichung" der Stimmgabelskalierung

Von den zwei übereinanderstehenden Zahlenreihen hinter jedem Skalenwert gibt jeweils die obere Zeile die bei Patienten mit PNP gefundenen Werte an, während die untere Zeile für Patienten mit MS gilt.
Aus Tabelle 9 kann nun die Abweichung des von der Versuchsperson angegebenen Stimmgabelskalenwertes (der jeweils mit der elektronisch bestimmten Schwingungsamplitude in µm gleichgesetzt wird) von den gleichzeitig apparativ gewonnenen Schwellenwerten berechnet werden. Setzt man zur Berechnung der Abweichung bzw. der in Prozent angegebenen Fehlerbreite gemäß der Streubreite jeweils den höchsten oder niedrigsten apparativ gefundenen Wert für jeden Skalenwert ein, ergibt sich für die Patienten mit PNP ein Fehler von 7 bis 26o %, bei den Patienten mit MS von 3 bis 378 %. Dabei beträgt die gesamte Streubreite bezogen auf den jeweiligen Skalenwert bei den Patienten mit PNP maximal 353 % und bei den Patienten mit MS maximal 455 %.

Die Abweichung der aus den Einzelmessungen bestimmten Mittelwerte ist etwas geringer. Sie schwankt zwischen 7 und 69 % bei den Patienten mit PNP und zwischen 3 und 73 % bei den Patienten mit MS. Die mittlere Abweichung der Mittelwerte liegt bei beiden Patientengruppen um 45 %. Mit Ausnahme von zwei Werten bei der Gruppe der MS-Patienten liegen alle empirisch gefundenen Mittelwerte überraschenderweise unter dem der Stimmgabelskalierung entsprechenden Wert. Das heißt, daß eine mit der Stimmgabel gefundene Vibrationsschwelle in Wirklichkeit meist einer kleineren Amplitude entspricht, als der Stimmgabelskalenwert erwarten läßt.

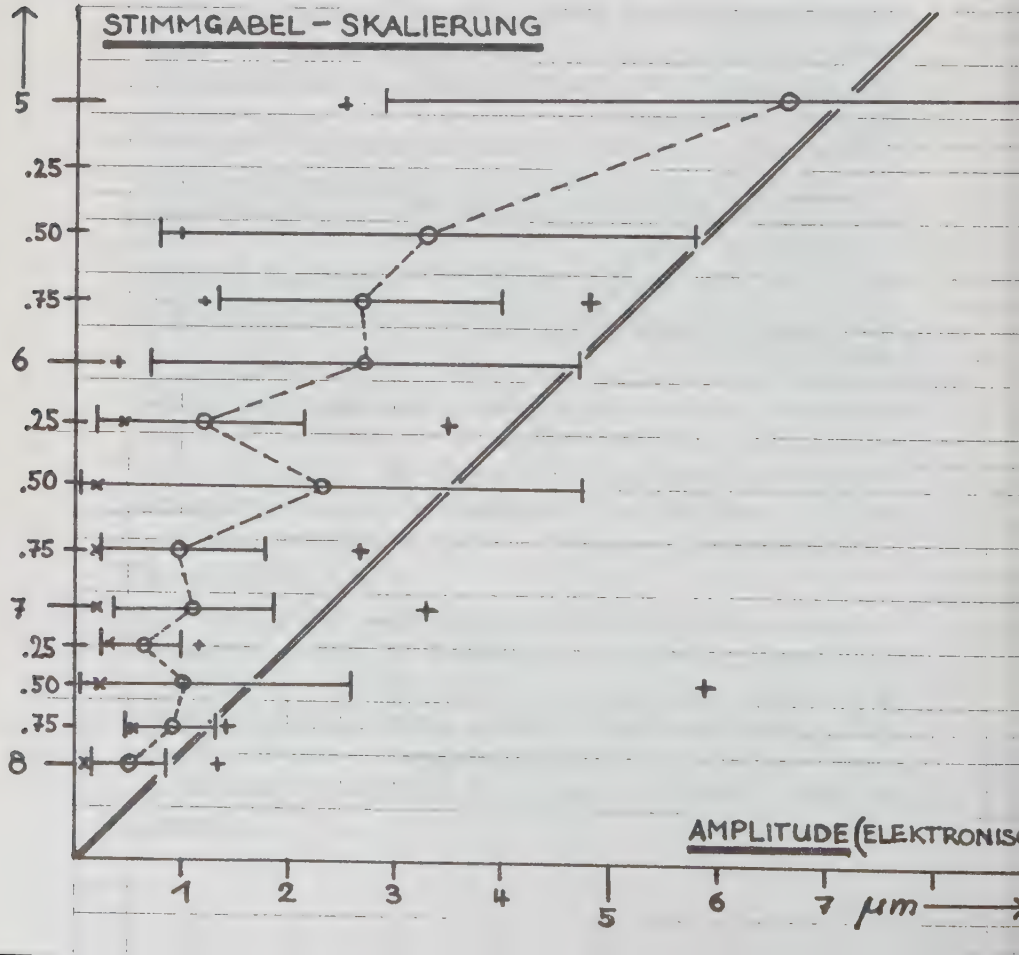
Die vorliegende Untersuchung zeigt also, daß mit der Stimmgabelmeßmethode zusätzlich zu der erheblichen Fehlerbreite (bis etwa 38o %) im Vergleich zu den apparativ gefundenen Werten stärker erhöhte Vibrationsschwellen festgestellt wurden. Entsprechend müßte dies klinisch fälschlicherweise als stärker ausgeprägte VE-Störung interpretiert werden.

Eine eindeutige Erklärung für diesen Unterschied der beiden Meßmethoden kann noch nicht gegeben werden. Ein wichtiger Teilfaktor ist wahrscheinlich das durch die physikalischen Eigenschaften der Stimmgabel bedingte rasch ablaufende Dekrement der Schwingungsamplitude. Möglicherweise spielt auch gerade bei der gestörten VE die Anklingzeit eine größere Rolle, als die Untersuchungen bei Gesunden (v. BEKESY, 1939; RITTMANNSBERGER, 1968) erwarten lassen. Die Anklingzeit gibt ein Maß für die Zeitdauer, die vergeht, bis ein gleichbleibender Vibrationsreiz in seiner vollen Stärke wahrgenommen wird. Es darf angenommen werden, daß bei rasch abnehmender Reizstärke vorzeitig keine VE mehr möglich ist, obwohl dieselbe Schwingungsamplitude, als kontinuierlicher Reiz dargeboten (wie es ja bei der apparativen Methode geschah), dann noch wahrgenommen werden kann.
Denkbar wäre auch, daß der oben beschriebene Lerneffekt (3.1.1./S.2o) durch Voranstellen der Stimmgabelmeßmethode zur Feststellung niedriger Schwellenwerte bei der apparativen Methode führt.
In Abb. 1o wird dieser Sachverhalt noch einmal anschaulich für die bei Patienten mit PNP gefundenen Werte dargestellt.

—O— = MITTELWERT

|—————| = DOPPELTE STANDARDABWEICHUNG

x x = STREUBREITE



5. Diskussion

In der vorliegenden Untersuchung werden zwei Meßmethoden zur Bestimmung der Vibrationsschwelle vergleichend an 93 Versuchspersonen bzw. Patienten angewendet. Hierbei zeigt sich die eindeutige Überlegenheit des Untersuchungsverfahrens mit Hilfe des neuentwickelten elektronischen Vibrationsmeßgerätes. Das Gerät selbst ist aufgrund seiner Konstruktionsmerkmale von Störeinflüssen unabhängig. Nach Umrechnung mit einem Eichfaktor erlaubt es die Vibrationsschwellenbestimmung in der Dimension der Längeneinheit. Demgegenüber sind bei Messung mit einer Stimmgabel nur Relativwerte zu erhalten; es sei denn, man wählt - wie hier geschehen - den Weg über eine elektronische Eichung der Stimmgabelskalierung. Der geringe Wert einer derartigen Eichung läßt sich jedoch aus der Tatsache erkennen, daß die Genauigkeit der Methode im wesentlichen limitiert wird durch die Zuverlässigkeit und Beobachtungsgabe des Untersuchten selbst. Dies hängt nicht zuletzt mit physikalischen Gesetzmäßigkeiten zusammen. Beim raschen Abklingen der Stimmgabelschwingung genügen kleine Zeitverzögerungen, um erhebliche Meßfehler zu bewirken. Dies zeigt auch die große Streubreite der in Tabelle 9 angegebenen Vergleichswerte zwischen apparativer und herkömmlicher Meßmethode. Die Fehlerbreite beträgt dabei bis zu 38o %.

Die Untersuchung an den gesunden Kontrollpersonen und den Patienten mit PNP oder MS bestätigt außerdem die klinisch praktische Anwendbarkeit des neuen Vibrationsmeßgerätes. Gleichzeitig lassen sich die in der Literatur wiederholt beschriebenen Beobachtungen über Vibrationsempfindungsstörungen bei PNP und MS aufzeigen, ebenso wie die bekannten altersabhängigen Veränderungen der Vibrationsschwelle.

Die jetzt vorliegenden Fallzahlen sind noch zu klein, um daraus verbindliche altersbezogene Normalwerte herzuleiten. Mit der angewendeten standardisierten, apparativen Untersuchungstechnik wird es leicht möglich sein, derartige Normalwerte zu gewinnen, die dann zur metrischen Beurteilung von Funktionsstörungen der VE herangezogen werden können. Denkbar ist sogar eine verbreitete Anwendung als Früherkennungsmethode z.B. bei vielen Stoffwechselstörungen oder auch an intoxikationsgefährdeten Arbeitsplätzen. Aber auch bei vielen anderen Erkrankungen stellt die sichere Feststellung einer VE-Störung ein wesentliches diagnostisches Kriterium dar. Selbstverständlich eignet sich das Verfahren auch zur Verlaufsbeobachtung, da Belastungen und Risiken für den Patienten fehlen.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wird eine herkömmliche Stimmgabeluntersuchungsmethode (in diesem Fall nach dem von GRADENIGO angegebenen Verfahren) mit den Meßwerten verglichen, die mit einem in dem Stuttgarter Institut für Biomedizinische Technik entwickelten Vibrationsmeßgerät gewonnen wurden. Bei diesem Gerät ist die Schwingungsamplitude vom Auflagedruck unabhängig.

Untersucht wurden 93 Personen (31 Gesunde, 31 Patienten mit Polyneuropathie und 31 Patienten mit multipler Sklerose). Die gute Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse spricht für die Zuverlässigkeit der apparativen Meßmethode.
Bei der Stimmgabelmeßmethode wurden Fehlerbreiten bis zu 38o % nachgewiesen. Eine derartige Methode führt daher allenfalls noch zu brauchbaren Ergebnissen in der Hand eines geübten neurologischen Untersuchers, der die Unzulänglichkeit der Stimmgabelmeßmethode mit persönlicher Erfahrung und Fachwissen kompensieren kann.

Wiederholt wurde auf die Bedeutung der Vibrationsempfindungsstörung als Frühsymptom hingewiesen. Bei dem allgemeinen Bemühen um Krankheitsfrüherkennung ist die hier erprobte Untersuchungstechnik mit dem leicht zu handhabenden und zuverlässig arbeitenden Vibrationsmeßgerät in hohem Maße dazu geeignet, als Standardmethode in die Klinik eingeführt zu werden.

Literaturverzeichnis

1. BARACH,J.H.: Test for Quantitative Vibratory Sensation in Diabetes, Pernicious Anemia and Tabes dorsalis, in: Archives of Internal Medicine 79 (1947) 6o2-13.

2. BEKESY,G.v.: Über die Vibrationsempfindung, in: Akustische Zeitschrift 4 (1939) 316-34.

3. BERCHTOLD,P.: Quantitative Bestimmung der Pallaesthesie bei diabetischer Neuropathie. Eine bio-thesiometrische Studie, in: Praxis 36 (1967) 1211-5.

4. BISCHOFF,A.: Die diabetische Neuropathie, Stuttgart, Thieme 1963.

5. CALNE,D.B. und PALLIS,C.A.: Vibratory Sense: A Critical Review, in: Brain 89 (1966) 723-46.

6. CLAUSS,G. und EBNER,H.: Grundlagen der Statistik, Frankfurt und Zürich, Harri Deutsch Verlag 197o.

7. COHEN,L.H. und LINDLEY,S.B.: Studies in Vibratory Sensibility, in: American Journal of Psychology 51 (1938) 44-63.

8. DUENSING,F. et al.: Korrelationen zwischen Veränderungen des sensiblen Nervenaktionspotentials und gestörter Vibrationsempfindung bei urämischer Polyneuropathie, in: Journal of Neurology 2o9 (1975) 243-53.

9. DYCK,P.J. et al.: Introduction of Automated Systems to Evaluate Touch-Pressure, Vibrations, and Thermal Cutaneous Sensation in Man, in: Annals of Neurology 4 Dec. 1978.

1o. FINKE,J.: Die neurologische Untersuchung, München, Lehmann 1968.

11. GOODFELLOW, L.D.: The Sensitivity of Various Areas of the Body to Vibratory Stimuli,
in: Journal of General Psychology 11 (1934) 435-4o.

12. Handbook of Clinical Neurology Vol. I,
Amstersam, North Holland Public Company 1969.

13. HENSEL, H. in: KEIDEL,W.D., Kurzgefaßtes Lehrbuch der Phyeiologie,
Stuttgart, Thieme 197o.

14. KATZ,D. und NOLDT,F.: Über die kleinsten vibratorisch wahrnehmbaren Schwingungen,
in: Zeitschrift für Psychologie 99 (1926) 1o4-1o9.

15. KEIDEL,W.D.: Vibrationsreception. Der Erschütterungssinn des Menschen,
Erlangen, Erlanger Forschungen 1956.

16. KLEIN,W.: Die Bestimmung des Vibrationsgefühls bei Läsionen zentraler Bahnen am Beispiel der Multiplen Sklerose,
Dissertation Würzburg 1969.

17. LAIDLAW,R.W. und HAMILTON,M.A.: Threshold of Vibratory Sensibility as determined by the Pallesthesiometer,
Bulletin of the Neurological Institute (New York)
6 (1937) 494-5o3.

18. MANN,L.: Störung der Vibrationsempfindlichkeit als Symptom der Multiplen Sklerose,
in: Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie
1o4 (1926) 443-48.

19. MIRSKY,A. et al.: The Quantitative Measurement of Vibratory Perception in Subjects with and without Diabetes Mellitus,
in: The Journal of Laboratory and Clinical Medicine
(St. Louis).

2o. MUMENTHALER,M.: Neurologische Komplikationen des Diabetes mellitus,
in: Schweizer Medizinische Wochenschrift 93 (1963) 518-2o.

21. NOLDT,F.: Ein Vibrator zu psychologischen Zwecken,
in: Zeitschrift für Psychologie 1oo (1926) 242-43.

22. PEARSON,G.H.J.: Effect of Age on Vibratory Sensibility,
in: Archives of Neurology and Psychiatry 2o (1928) 482-496.

23. PERRET,E. und REGLI,F.: Age and the Perceptual Threshold of Vibratory Stimuli,
in: European Neurology 4 (197o) 65-76.

24. RAICH,R.: Schwellenänderung von Vibrations-Schmerz- und Drucksinn nach vibratorischer Ermüdung,
Dissertation Erlangen 1952.

25. RITTMANNSBERGER,N.: Über die Vibrationsstärke-Empfindung und die Wahrnehmbarkeit von Reizstärkeänderung beim Tastsinn,
in: Kybernetik 4 (5) (1968) 181-89.

26. ROOS,D.: The Vibration Perception Threshold in Gastrectomized Patients with low Serum B12.
A Clinical and Biothesiometric Follow-up after Intensive B12 Therapy,
in: Acta neurologica scandinavica 56 (1977) 551-62.

27. RUMPF,H.T.M., Über einen Fall von Syringomyelie nebst Beiträgen zur Untersuchung der Sensibilität,
in: II Neurologisches Centralblatt 8 (1889) 222-3o.

28. RYDEL,A. und SEIFFER,W.: Untersuchung über das Vibrationsgefühl oder die sog. "Knochensensibilität" (Palläesthesie),
in: Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten 37 (1903) 488-536.

29. SCHILLING,A. und BIENER,W.: Messung der Vibrationsempfindung mittels Audiometer und Ergebnisse dieser Untersuchung bei Stotterern,
in: Nervenarzt 30 (1959) 279-81.

30. SEILER,J. und RICKER,K.: Das Vibrationsempfinden. Eine apparative Schwellenbestimmung,
in: Zeitschrift für Neurologie 200 (1971) 70-9.

31. SETZEPFAND,W.: Zur Frequenzabhängigkeit der Vibrationsempfindung des Menschen,
in: Zeitschrift für Biologie 96 (1935) 236-40.

32. SILBERNAGL,S. und DESPOPOULOS,A.: Taschenatlas der Psychologie,
Stuttgart, Thieme 1979.

33. SKRAMLIK,E.v.: Beiträge zur Psychophysiologie der Sinnesleistungen. Psychophysiologie der Tastsinne. Archiv für die gesamte Psychologie.
Vierter Ergänzungsband, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft 1937.

34. STEINESS,I.: Vibratory Perception in Normal Subjects. A Biothesiometric Study,
in: Acta Medica Scandinavica 158 (1957) 315-25.

35. STEINESS,I.: Vibratory Perception in Diabetics. A Biothesiometric Study,
in: Acta Medica Scandinavica 158 (1957) 327-35.

36. STERLING,W.: Untersuchungen über das Vibrationsgefühl und seine klinische Bedeutung.
in: Deutsche Zeitschrift für Nervenheilkunde 29 (1905) 57-112.

37. SYMNS,J.L.M.: An Accurate Method of Estimating the Vibratory Sense,
in: British Medical Journal 1 (1912) 539-4o.

38. TOOMEY,J.A. et al.: Measurement of Sensation,
in: Archives of Neurology and Psychiatry (Chicago) 61 (1949) 663-71.

39. TREITEL: Über das Vibrationsgefühl der Haut,
in: Archiv für Psychiatrie 29 (1897) 633-4o.

4o. WEITZ,J.: Vibratory Sensitivity as a Function of Skin Temperature,
in: Journal of Experimental Psychology 28 (1941) 31-36.

41. WEIZSÄCKER,V.v.: in: Handbuch der Neurologie, Vol.III, Berlin, Springer 1937.

42. WILSKA,A.: On the Vibrational Sensitivity in Different Regions of the Body Surface,
in: Acta physiologica scandinavica 31 (1954) 285-89.

Verzeichnis der Abkürzungen

APP	=	Apparative Meßmethode
GG	=	Großzehengrundgelenk
L	=	links
m	=	arithmetisches Mittel
MFG	=	Mittelfingergrundgelenk
MM	=	Malleolus medialis
MS	=	Multiple Sklerose
PNP	=	Polyneuropathie
R	=	rechts
s	=	Standardabweichung
ST	=	Stimmgabelmeßmethode
TT	=	Tuberositas tibiae
VE	=	Vibrationsempfindung

Lebenslauf

Am 7.10.1944 wurde ich, Gerhard Hinrich Friedrichs, als sechster Sohn des Studienrats Fritz Friedrichs und seiner Ehefrau Else Friedrichs, geb. Raschke, in Detmold geboren. Meinen Vater lernte ich allerdings nicht mehr kennen, da er im Frühjahr 1945 in einem Lazarett in Klagenfurt/Österreich verstarb, was unserer Familie aber erst nach zehn Jahren des vergeblichen Wartens mitgeteilt wurde.

Nach vier Grundschuljahren besuchte ich bis zum Abitur im Jahre 1964 das naturwissenschaftlich-mathematische Gymnasium Leopoldinum II in Detmold. Danach nahm ich das Medizinstudium an der Universität Marburg auf. Nach der ärztlichen Vorprüfung wechselte ich an die Universität Hamburg, wo ich am 19.8.1970 die ärztliche Prüfung ablegte. Im März 1972 erhielt ich die Approbation als Arzt.

Vom 1.4. bis zum 31.12.1972 arbeitete ich als Assistenzarzt in der Inneren Abteilung und anschließend bis zum 31.12.1974 in der Neurologisch-Psychiatrischen Abteilung des Albertinen-Krankenhauses in Hamburg.

Dann zog ich mit meiner Familie nach Esslingen um, wo ich vom 1.1.1975 bis zum 31.3.1977 in der Psychosomatischen Abteilung der Städtischen Krankenanstalten Esslingen tätig war.

Vom 1.4.1977 bis zum 31.5.1978 arbeitete ich in der Psychiatrischen Klinik, und seit dem 1.6.1978 bin ich in der Neurologischen Klinik des Bürgerhospitals, Stuttgart, tätig.

Druck: Behr-Fotodruck
Telefon: (0711) 62 61 18
Reinsburgstraße 84
7000 Stuttgart 1